

**Gletscherwasserressourcen
der Issyk-Kul-Region (Kirgistan),
ihr gegenwärtiger und zukünftiger Zustand**

von
A. N. DIKICH¹

Nr. 19, Gießen im August 2004

¹ Institut für Geologie, Abteilung Glaziologie, Nationale Akademie der Wissenschaften der Republik Kirgistan, Bischkek

Inhaltverzeichnis

1	Lufttemperatur und Niederschlag in der Hochgebirgszone und ihr Einfluss auf die Abflussbildung.....	1
1.1	Lufttemperatur.....	3
1.2	Niederschlag.....	9
2	Stand und Entwicklung der Vergletscherung.....	13
2.1	Allgemeine Charakteristika.....	13
2.1.1	Morphologie und Morphometrie der Gletscher.....	14
2.1.2	Massenhaushalt der Gletscher.....	20
2.1.3	Gletscherschwankungen.....	27
3	Abflussbildung in den Teileinzugsgebieten.....	29
3.1	Gesamtabfluss.....	30
3.2	Die Bedeutung der Gletscher bei der Abflussbildung.....	33
3.3	Abflussregime in Jahren mit extremen meteorologischen Bedingungen.....	38
4	Auswirkungen der Klimaänderung auf den Gletscherabfluss.....	46
4.1	Abflussveränderungen in Einzugsgebieten mit unterschiedlichem Vergletscherungsgrad.....	46
4.2	Temperaturschwankungen.....	49
4.3	Änderung des Niederschlags.....	51
4.4	Der Gletscherabfluss bis Mitte des 21. Jahrhunderts.....	56
4.5	Abflussänderungen in Teileinzugsgebieten mit unterschiedlichem Vergletscherungsgrad.....	57
5	Zusammenfassung.....	61
6	Literaturverzeichnis.....	63

Abbildungen

- Abb. 1: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen verschiedener Stationen.
- Abb. 2: Entwicklung der jährlichen und sommerlichen Niederschlagsmengen der Station Prževal'sk bezogen auf verschiedene Bezugszeiträume.
- Abb. 3: Entwicklung maximaler Wasseräquivalente der Schneedecke auf dem mittleren Teil des Kara-Batkak-Gletschers.
- Abb. 4: Entwicklung der Eisschmelze des Kara-Batkak (1957-2000).
- Abb. 5: Kumulative Massenbilanzkurven von Gletschern aus dem Tjan'-Šan' und dem Alaj.
- Abb. 6: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Ojtal).
- Abb. 7: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Toruajgyr, Kyzyl-Bulak Mündung).
- Abb. 8: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Tjup).
- Abb. 9: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Turasu).
- Abb. 10: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Con-Aksu – Station Grigor'evka).
- Abb. 11: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Con-Kyzyl-Suu – Waldposten).
- Abb. 12: Entwicklung des mittleren Jahresabflusses von I – Con-Kyzyl-Suu; II – Džergalan; III – Con-Aksu; IV – Ojtal.
- Abb. 13: Entwicklung des mittleren Jahresabflusses von Flüssen mit unterschiedlichem Abflussregime.
- Abb. 14: Entwicklung der Jahres- und Sommermitteltemperaturen der Stationen Pokrovka und Tjan'-Šan'.
- Abb. 15: Änderung des Niederschlags mit der Höhe.
- Abb. 16: Entwicklung der Niederschlagsmengen an der Station Tjan'-Šan' (1930 – 2000).

Tabellen

- Tab. 1: Monatsmitteltemperaturen (°C) ausgewählter Stationen.
- Tab. 2: Korrelationskoeffizient (R^2) der Lufttemperatur zwischen den Stationen im Con-Kyzyl-Suu Tal.
- Tab. 3: Streuungsparameter der Lufttemperatur.
- Tab. 4: Temperaturgradienten an der Nordabdachung des Terskej Alatau (°C/100 m).
- Tab. 5: Berechnete Monatsmitteltemperaturen (°C) in unterschiedlichen Höhenlagen des Issyk-Kul'-Beckens.
- Tab. 6: Vergleich der Monatsmitteltemperaturen der Stationen Prževal'sk und Tjan'-Šan' zu verschiedenen Zeiträumen.
- Tab. 7: Vertikale Niederschlagsgradienten an der Nordabdachung des Terskej Alatau (Dikich, Michajlova 1976).
- Tab. 8: Durchschnittliche jährliche Niederschlagsmengen (mm/a) in verschiedenen Höhenbereichen (1956-1986) (Dikich, Michajlova 1976).
- Tab. 9: Monatliche Verteilung und Variabilität der Niederschläge.
- Tab. 10: 30jährige Niederschlagsmittel der Stationen Prževal'sk und Tjan'-Šan' und ihre Abweichung vom langjährigen Mittel.
- Tab. 11: Morphologische Typen von Gletschern ($>0.1 \text{ km}^2$) im Issyk-Kul'-Becken und ihre zahlen- und flächenmäßige Bedeutung.
- Tab. 12: Anzahl der Gletscher nach Größenklassen.
- Tab. 13: Anzahl (n) und Fläche (F, in km^2) der Gletscher in den Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens.
- Tab. 14: Verteilung der Gletscherfläche (F, km^2) und des Gletschervolumens (V, km^3) nach der Höhe.
- Tab. 15: Tägliche Sonneneinstrahlung auf Hängen unterschiedlicher Exposition und Neigung (MJ/m^2).
- Tab. 16: Verteilung der Gletscher nach ihrer Exposition.
- Tab. 17: Schneehöhen auf Gletschern im Con-Kyzyl-Suu-Tal (Terskej Alatau), in cm.
- Tab. 18: Mächtigkeit der Schneedecke in verschiedenen Höhen auf dem Gletscher Nr. 131 (Barskaun-Becken).
- Tab. 19: Spezifische Massenbilanzen (B) des Kara-Batkak (mm).

- Tab. 20.: Akkumulation (Ak), Ablation (Ab) und Nettobilanz (B) in verschiedenen Höhenstufen auf dem Gletscher Nr. 131 (mm).
- Tab. 21.: Entwicklung (Trend) der Sommertemperatur (t°) und des Jahresniederschlags (N).
- Tab. 22.: Prognostizierte Entwicklung der Gletscherfläche (F) und des Gletschervolumens (V) im Issyk-Kul'-Becken bei einer Klimaerwärmung um 2°C (Dikich et al. 1999). Berücksichtigt wurden nur Gletscher mit einer Mindestfläche von $0,1 \text{ km}^2$.
- Tab. 23.: Topographische und hydrologische Charakteristika der Teileinzugsgebiete.
- Tab. 24.: Veränderung der Abflussspende ($\text{l/s} \cdot \text{km}^2$) mit der Höhe. Die Werte in Klammern wurden mit Hilfe der Formel $M_o = f(H_{cp})$ errechnet.
- Tab. 25.: Abflussmenge, Wasserentnahme für Bewässerung und meteorologische Bedingungen am Con-Kyzyl-Suu im Jahr 1973.
- Tab. 26.: Korrelationskoeffizient (R^2) zwischen dem Abfluss für Juni–August (Q_s) und der Temperatur im Jahresmittel (T) und im Juli (Tvii) sowie den Niederschlägen von Juni-August (P_s) und Juli (Pvii).
- Tab. 27.: Gletscherabfluss und Gesamtabfluss (Mio. m^3/a) der Flüsse im Issyk-Kul'-Becken.
- Tab. 28.: Jahresmitteltemperatur T ($^\circ\text{C}$) und Niederschlagssumme N (mm) der Station Pokrovka (Kyzyl-Suu).
- Tab. 29.: Mittlerer Abfluss zu verschiedenen Jahreszeiten und Zeiträumen für typische Flüsse des Issyk-Kul'-Beckens (m^3/s).
- Tab. 30.: Mittelwerte und Trends der Jahres- und Sommertemperaturen für unterschiedliche Höhenzonen und Zeiträume.
- Tab. 31.: Mittelwerte und Trends der Jahres- und Sommerniederschläge (mm) der meteorologischen Station Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.) für unterschiedliche Zeiträume.
- Tab. 32.: Änderung des Jahresniederschlags in verschiedenen Höhenzonen.
- Tab. 33.: Szenarien der Niederschlagsänderung nach einer Verdopplung des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre.
- Tab. 34.: Flächen-Höhen-Verteilung und andere glaziologische und hydrologische Kenngrößen der Gletscher in verschiedenen Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens.
- Tab. 35.: Glazialhydrologische Kenngrößen im Jahr 2050.

Vorwort

Die vorliegende Untersuchung von Dr. A. N. Dikich, Glaziologe und Stellvertretender Direktor des "Instituts für Geologie" der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften in Biškek, wurde im Rahmen der Arbeiten zum Forschungsprojekt: "Wasserverknappung, Wassernutzungskonflikte und Wassermanagement in Trockengebieten Zentralasiens (Usbekistan, Kasachstan, Kirgistan, Xinjiang/VR China)" erstellt.

Das Ziel des Forschungsprojektes besteht darin, die Ursachen und Auswirkungen der zunehmenden Wasserverknappung und Verschlechterung der Wasserqualität in den Trockengebieten Zentralasiens zu untersuchen. Die Untersuchungen werden vergleichend in vier abflusslosen Beckenbereichen vorgenommen: im Aralsee-Becken, Ili-Balchaš-Becken, Issyk-Kul'-Becken und Tarim-Becken. Die Untersuchung von A. N. Dikich ist Teil der Arbeiten zum Issyk-Kul'-Becken. Sie steht in enger Verbindung zu den Untersuchungen von Dr. V. V. Romanovskij, Hydrologe und Leiter des Labors am "Institut für Wasserprobleme und Hydroelektroenergie" der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften in Biškek, der sich allgemein mit dem Aufkommen und der Nutzung der Wasserressourcen im Issyk-Kul'-Becken beschäftigt und dabei das Abflussverhalten der Flüsse im Becken sowie die Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' untersucht. Die Arbeiten hierzu sollen zu einem späteren Zeitpunkt publiziert werden.

Die von A. N. Dikich auf russisch vorgelegten Arbeiten wurden von Katrin Zitzmann übersetzt und nachfolgend von Dr. Wilfried Hagg, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München, fachlich überarbeitet. Beiden sei für ihre Unterstützung herzlich gedankt.

Danken möchte ich auch der Volkswagen-Stiftung, die das auf vier Jahre angesetzte Forschungsprojekt (Mai 2001 - April 2005) im Rahmen der Förderinitiative "Mittelasien / Kaukasus im Focus der Wissenschaft" unterstützt.

Gießen im August 2004

Prof. Dr. Ernst Giese
(Projektleiter)

1. Lufttemperatur und Niederschlag in der Hochgebirgszone und ihr Einfluss auf die Abflussbildung

Wegen seiner Abgeschlossenheit entzieht sich das Issyk-Kul'-Becken vielen wasserrelevanten Problemen, die für andere Regionen charakteristisch sind. So entstehen keine Konfliktsituationen, die mit internationalen Ansprüchen am gleichen Gewässer verbunden sind, da der gesamte Oberflächenabfluss, der im Einzugsgebiet des Issyk-Kul' gebildet wird, im geschlossenen Becken verbleibt. Des weiteren wird die anderen Orts problematische Ausweitung von Ackerbauflächen hier nicht durch Wassermangel begrenzt.

Die Absenkung des Seespiegels ruft große Besorgnis hervor. Ohne näher auf die Frage der Seespiegelschwankungen einzugehen, ist zu bemerken, dass sie mehrere Ursachen haben. Die wichtigsten sind klimatisch verursachte Veränderungen des Zuflusses, wobei die wichtigsten Faktoren hierbei Schwankungen der Niederschlagsmenge und der Lufttemperatur sind, die den Umfang der Verdunstung steuern.

In diesem Kapitel soll zunächst eine Bewertung und Abschätzung jener klimatischen und hydrologischen Faktoren erfolgen, die sich entscheidend auf die Abflussbildung auswirken.

Eine Besonderheit der naturräumlichen Ausstattung des Issyk-Kul'-Beckens ist die große horizontale und vertikale Diversität. Auf einer geringen Horizontaldistanz erfolgt hier ein schneller Wechsel von Landschaften, von Wüsten und Halbwüsten über Grassteppen und Wälder bis hin zum alpinen und nivalen Höhengürtel. Ebenso schnell ändern sich Niederschläge und Temperaturen, und es existiert eine bedeutende räumliche Variation in der Abflussbildung. Detaillierte Wasserhaushaltsstudien über einen Zeitraum von 10 Jahren im Con-Kyzyl-Suu Tal (Dikich, Michajlova 1976) sowie glaziologische und hydrometeorologische Untersuchungen in anderen Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens, haben folgendes gezeigt:

- Es können drei unterschiedliche Gürtel der Abflussbildung unterschieden werden: Hochgebirgslagen (höher als 3300 m ü. M.) mit einem Abflussverhältnis (Abfluss/Niederschlag) von 0,86 haben einen Anteil von 80-87% am Jahresabfluss des Beckens. Der Mittelgebirgsgürtel reicht von 3300 m ü. M. bis 2500 m ü. M.; hier werden bei einem Abflusskoeffizienten von 0,13–0,5 10-17% des Gesamtabflusses gebildet. Der Vorgebirgsgürtel, der sich von den Ufern des Issyk-Kul' (1606 m ü. M.) bis zu einer Höhe von 2500 m ü. M. ausdehnt, ist nur für 0-2% des jährlichen Abflussvolumens verantwortlich. Der Abflusskoeffizient liegt hier unter 0,1.

- Die Anteile der einzelnen Abflussquellen am Gesamtabfluss ändert sich mit dem Vergletscherungsgrad.
- Flüsse in vergletscherten Teileinzugsgebieten zeigen eine relativ geringe Jahr-zu-Jahr Variation des Sommerabflusses. Der Variationskoeffizient (CV), liegt bei diesen Flüssen zwischen 0,14 und 0,21.
- Die Stabilität des Abflusses wird in feuchten Jahren durch Niederschläge, in trockenen Jahren und bei Temperaturen über 0,7°C durch Gletscherschmelzwasser garantiert.

Die bedeutende Rolle von Temperatur und Niederschlag bei der Abflussbildung veranlasste die Forscher, dem Regime dieser Klimaelemente in der Hochgebirgszone größere Aufmerksamkeit zu schenken. Dabei ist es notwendig, die intramontane Lage des Issyk-Kul'-Beckens und die besondere Orographie mit der tiefen Zergliederung des Reliefs zu berücksichtigen sowie auf Besonderheiten in der atmosphärischen Zirkulation, welche das Niederschlagsregime und die Temperatur beeinflussen, zu achten. In früheren Arbeiten (Dikich 1982) wurde bereits eine Abhängigkeit der Lufttemperatur vom Typ des jeweiligen synoptischen Prozesses, der in den Sommermonaten abläuft, festgestellt. Während bei nördlichen und nordwestlichen Kaltlufteinbrüchen 1,4°C bis 3,4°C gemessen werden, steigt die Lufttemperatur bei einem ausgedehnten Tiefdruckgebiet auf 5,5°C an und erreicht beim Verbleib der Warmfront mit 7,3°C den höchsten Wert, der in dem Gebiet vorkommt.

Ähnliche Gesetzmäßigkeiten sind auch für den Niederschlag charakteristisch, nur zeigt sich hier eine räumliche Differenzierung. Im westlichen Teil des Beckens werden 34% der Sommerniederschläge durch Luftmasseneinfälle aus westlichen Richtungen verursacht. Im zentralen und östlichen Teil gehen 29% auf westliche Zyklonen zurück, 19% der Niederschläge stehen im Zusammenhang mit nordwestlichen Kaltlufteinbrüchen und 17% mit Wellenzirkulation (Polomarenko 1976). Für das Temperatur- und Niederschlagsregime sind nicht nur Mittelwerte, sondern auch jahreszeitliche Verteilungen und Häufigkeiten bestimmter Ereignisse von Bedeutung. Nach Untersuchungen von Meteorologen (Kurbatkin et al. 1980) gibt es auf dem Gebiet Kirgisistans 17 Typen synoptischer Prozesse. Die mittlere Häufigkeit ihres Auftretens änderte sich in den Zeiträumen 1968-1978 und 1984-1997 von 0,1-0,2% (im Falle „Abfließen von Warmluft auf breiter Front“ bzw. „Hochdruck“) bis 13,9-15,1% (im Falle „Warmfront“ oder „vorfrontale Lage“ bzw. „westliche Luftströmung“) (Pavlova 2001).

Die Häufigkeit des Auftretens bestimmter synoptischer Prozesse verschiebt sich auch jahreszeitlich. Im Winter und Herbst überwiegt die südwestliche Randlage des sibirischen Hochs mit einem Auftreten an 16,3% bzw. 15,7% aller Tage. Im Frühjahr herrscht mit 15,5% westliche Luftströmung und im Sommer mit 22,8% ausgedehnter Tiefdruck vor (Pavlova 2001). Diese Großwetterlagen bilden den Hintergrund für das Auftreten bestimmter Temperaturen und Niederschläge in den unterschiedlichen Jahreszeiten.

1.1 Lufttemperatur

In Anbetracht des äußerst spärlichen Netzes von meteorologischen Stationen im Mittel- und Hochgebirgsgürtel und ihres vergleichsweise häufigen Auftretens in der Vorgebirgszone, ist es notwendig, das Temperaturregime hinsichtlich seines allgemeinen Charakters sowie dessen räumlichen und zeitlichen Veränderungen zu betrachten. Diese Vorgehensweise wird durch die Gesetzmäßigkeiten der Temperaturänderung mit der Höhe ermöglicht. Da die Intensität dieser Änderung bedeutenden räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, sollte kein allgemeingültiger Gradient angewandt, sondern für jede Region und Jahreszeit nach Möglichkeit ein individueller Wert bestimmt werden. Ein gewisser Aufwand findet hierbei durchaus seine Berechtigung, da Ungenauigkeiten bei der Temperaturbestimmung große Fehler bei der Berechnung des Wasserhaushalts bewirken können.

Für die Analyse des Temperaturregimes wurden langjährige Messreihen der meteorologischen Stationen im Con-Kyzyl-Suu Tal (zentraler Teil der Nordabdachung des Terskej Alatau) herangezogen (Tab. 1).

Tab. 1: Monatsmitteltemperaturen (°C) ausgewählter Stationen.

Station (Meereshöhe)	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Pokrovka (1740 m ü. M.)	-5,1	-3,8	0,8	7,2	11,6	14,6	17,1	16,4	12,7	7,2	0,5	-3,3	6,3
Große Kyzyl- Suu (2550 m ü. M.)	-11,5	-9,5	-4,6	1,2	5,5	8,1	10,5	10,1	6,5	1,3	-5,9	-10,2	0,1
Kara-Batkak (3415 m. ü. M.)	-13,1	-12,5	-8,4	-2,9	0,4	3,3	5,5	5,3	2,1	-2,7	-7,8	-11,0	-3,5
Prževal'sk (1716 m ü. M.)	-6,6	-5,2	0,4	7,4	11,8	14,8	16,9	16,3	12,3	6,2	-0,3	-4,3	5,9

Die Station Prževal'sk (Karakol) besitzt die längste Messreihe; ihre Werte werden von vielen Autoren nicht nur als charakteristisch für das Issyk-Kul'-Becken, sondern für den gesamten zentralen Tjan'-Šan' betrachtet.

Trotz der allgemein gültigen Temperaturniedrigung mit der Höhe variieren die Korrelationskoeffizienten zwischen den Stationen mit den Jahreszeiten (Tab. 2).

Tab. 2: Korrelationskoeffizient (R^2) der Lufttemperatur zwischen den Stationen im Con-Kyzyl-Suu Tal

Stationen	Korrelationskoeffizient		
	Winter	Sommer	Jahr
Kara-Batkak/Prževal'sk	0,37	0,69	0,37
Pokrovka/Prževal'sk	0,86	0,94	0,87
B.Kyzyl-Suu/Prževal'sk	0,42	0,87	0,48
Kara-Batkak/B.Kyzyl-Suu	0,47	0,86	0,55
Kara-Batkak/Pokrovka	0,40	0,67	0,48
B.Kyzyl-Suu/Pokrovka	0,44	0,85	0,69

Hohe Korrelationskoeffizienten während des ganzen Jahres zeigen nur die beiden Vorgebirgsstationen Pokrovka und Prževal'sk. Im Sommer zeigt sich in allen Höhenzonen eine höhere Korrelation, auch wenn die R^2 -Werte von 0,67-0,94 eine relativ große Bandbreite aufweisen. Dies veranschaulicht die Unsicherheiten, die sich bei der Extrapolation von Lufttemperaturen aus dem Vorgebirge in die Hochgebirgszone ergeben. In

den hohen Lagen unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten für die kalte Periode nicht von den Werten für das ganze Jahr.

Die in Tabelle 3 angegebenen Streuungs-Parameter geben eine Vorstellung über die Jahr-zu-Jahr Variation der monatlichen Lufttemperaturen.

Tab. 3: Streuungsparameter der Lufttemperatur

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Kara-Batkak (3415 m. ü. M.).													
Standard-abweichung (s)	1,69	2,53	1,74	1,36	1,47	1,12	1,14	1,35	1,33	1,46	1,72	1,89	0,63
Variations- koef-fizient (CV)	0,13	0,20	0,21	0,47	3,67	0,34	0,21	0,25	0,63	0,57	0,22	0,17	0,18
Prževal'sk (1716 m ü. M.)													
Standard-abweichung (s)	1,2	1,6	1,5	1,3	1,3	1,0	1,1	0,9	1,0	1,2	1,6	1,8	0,5
Variations-koeffizient (CV)	0,18	0,31	3,75	0,18	0,11	0,07	0,07	0,06	0,08	0,19	5,33	0,42	0,08

Ein Charakteristikum der Temperatur ist die enorme Bandbreite der einzelnen Monatswerte von Jahr zu Jahr, vor allem in den Übergangsjahreszeiten. Die niedrige Korrelation zwischen Temperaturen höherer und niedrigerer Zonen während der Wintermonate lässt sich nur durch die große Variabilität der Temperaturen der Vorgebirgszone erklären.

In der Sommerzeit nehmen die Temperaturunterschiede zwischen Vorgebirgs- und Hochgebirgslagen zu. Während im Januar eine Differenz von 6,4°C besteht, erreicht sie im Sommer bis zu 11,4°C. Der Temperaturgradient und damit auch die Genauigkeit der Temperaturextrapolation in hohe Lagen kann sich durch orographische Besonderheiten des Reliefs deutlich ändern. Tabelle 4 veranschaulicht, wie sich die Temperaturgradienten an der Nordabdachung des Terskej Alatau in Abhängigkeit ihrer Höhenlage unterscheiden können.

Tab. 4: Temperaturgradienten an der Nordabdachung des Terskej Alatau (°C/100 m).

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Prževal'sk / Kara-Batkak	0,38	0,43	0,52	0,61	0,67	0,68	0,67	0,65	0,60	0,52	0,44	0,39	0,55
Pokrovka/ Kara-Batkak	0,48	0,52	0,55	0,60	0,67	0,67	0,69	0,66	0,63	0,59	0,80	0,46	0,59
Pokrovka/ B.Kyzyl-Suu	0,75	0,70	0,67	0,74	0,75	0,80	0,81	0,78	0,77	0,73	0,79	0,85	0,77
B.Kyzyl-Suu/ Kara-Batkak	0,17	0,31	0,39	0,42	0,53	0,50	0,57	0,50	0,46	0,41	0,20	0,08	0,37

Die größten Abweichungen treten in den Wintermonaten auf, die geringsten im Sommer. Daraus und aus dem zuvor Gesagten lässt sich ableiten, dass die stabilsten Gradienten in der warmen Jahreszeit und in großen Höhen auftreten und dort eine hinreichend genaue Berechnung hydrologischer Größen wie der Verdunstung, der Schnee- und Gletscherschmelze und des Abflusses ermöglichen. Für Hochgebirgszonen ist eine hohe Korrelation ($R^2=0,94$) zwischen den Monatsmitteln von Verdunstung und Lufttemperatur erkennbar.

$E=12,7t+4,0$ (Dikich, Michajlova 1976)

E = Verdunstungsmenge in mm

t = Monatsmitteltemperatur in °C

Abweichungen bei der Bestimmung der Lufttemperatur von nur 1°C verändern die Gebietsverdunstung bereits um 12% und führen zu einer fehlerhaften Berechnung des Abflusses. Aus früheren Berechnungen von Temperaturgradienten (Rjazanceva 1965) und eigenen Forschungsergebnissen (Dikich, Michajlova 1976) ergibt sich folgende mittlere Temperaturverteilung für das Issyk-Kul'-Becken (Tabelle 5).

Tab. 5: Berechnete Monatsmitteltemperaturen (°C) in unterschiedlichen Höhenlagen des Issyk-Kul'-Beckens.

	Januar		Juli
Höhe (m. ü. M.)	östlicher Teil	nördlicher und südlicher Teil	gesamtes Becken
2600	-10,7	-9,2	11,2
2800	-11,6	-10,2	9,8
3000	-12,5	-11,1	8,4
3200	-13,4	-12,1	7,1
3400	-14,3	-13,1	5,7

Bei der Bestimmung der Lufttemperatur in der Hochgebirgszone aus seenahen Vorgebirgsstationen ist außerdem der Einfluss des Issyk-Kul' auf das Temperaturregime und auf die ausgeprägte Ungleichverteilung der Niederschläge zu berücksichtigen. Unterschiede in der Niederschlagsverteilung wirken sich auf die Schneedeckendauer und somit auch auf die Lufttemperatur im Winter aus. Bei einem Höhenunterschied von nur 26 m beträgt die Januartemperatur in Prževal'sk $-6,6^{\circ}\text{C}$ und in Tamga $-2,4^{\circ}\text{C}$, die durchschnittliche Anzahl der Tage mit Schneedecke liegt entsprechend bei 116 und 24. Im Sommer verringert sich der Temperaturunterschied. Im Juli besteht zwischen den genannten Stationen nur eine Differenz von $0,8^{\circ}\text{C}$, was in bestimmten Fällen erlaubt, die Temperaturen der Hochgebirgszone aus Vorgebirgsstationen abzuschätzen.

Der zeitliche Trend der Temperatur

Es ist von großem Interesse, sowohl die Jahr-zu-Jahr Schwankungen der Temperatur als auch die mehrjährigen Trends quantitativ zu erfassen. Die in Tabelle 3 aufgeführten Standardabweichungen (s) zeigen hohe Jahr-zu-Jahr Variationen von etwa 70 %. Für die Bewertung einer Klimaänderung ist es jedoch wichtig, langfristige Trends im Gegensatz zu kurzzeitigen Oszillationen herauszuarbeiten. Die Analyse der 110-jährigen Reihe der meteorologischen Station Prževal'sk zeigt den Trend einer Temperaturerhöhung mit einer Rate von $0,006^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$. Der stärkste Temperaturanstieg fand zwischen 1970 und 1990 statt.

Mit Hilfe nachfolgender Formel (Ventcel' 1962) wurde jedoch festgestellt, dass sich der Trend als unsicher erweist:

$$t(k-1) = \beta_1 / s\beta_1$$

wobei β_1 : Koeffizient der Funktion $\beta_0 + \beta_1 t$, die die Geschwindigkeit der Temperaturänderung (t) charakterisiert

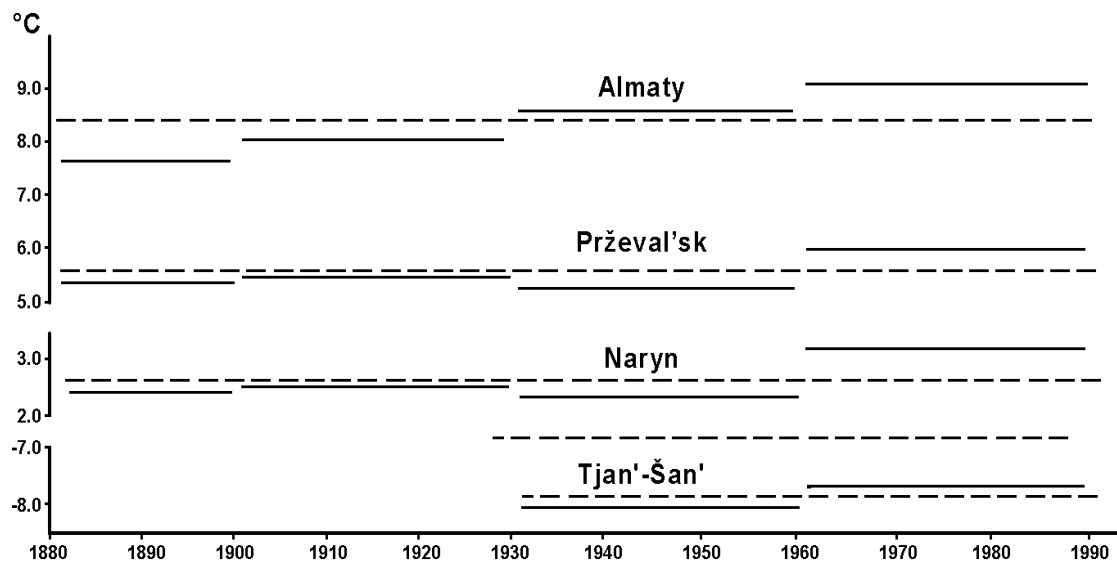
β_0 : langjähriges Mittel der Lufttemperatur

$s\beta_1$: Streuung des Koeffizienten β_1

k : Umfang der Stichprobe

Es wurde eine vergleichende Analyse der Temperaturen in verschiedenen Zeiträumen durchgeführt. Durch Beschluss der WMO wurde die 30-jährige Periode von 1931 bis 1960 als Bezugszeitraum festgelegt. Die Temperatur dieses Zeitraums wird mit denen der vorangegangenen und der nachfolgenden 30 Jahre verglichen, so dass eine Aussage über den Charakter der Temperaturänderung möglich ist (Abb. 1).

Abb. 1: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen verschiedener Stationen



Zur genaueren Analyse wurden Monatswerte der Stationen Prževal'sk (1716 m ü. M.) und Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.) herangezogen (Tab. 6). Letztere liegt in der Nähe des zentralen Teils des Terskej Alataus und zeigt einen synchronen Temperaturverlauf ($R^2=0,84$) zur Mittel- und Hochgebirgszone.

Tab. 6: Vergleich der Monatsmitteltemperaturen der Stationen Prževal'sk und Tjan'-Šan' zu verschiedenen Zeiträumen.

Station	Zeitraum	Jan	Mrz	Jul	Okt	Jahr	Jun-Aug
Prževal'sk (1716 m ü. M.)	1901-1930	-6,1	6,6	16,8	6,1	5,6	16,1
	1931-1960 (t1)	-7,0	7,0	16,9	6,2	5,5	15,9
	1961-1990 (t2)	-6,3	7,8	17,2	6,6	6,2	16,4
	Δt (t2-t1)	0,7	0,8	0,3	0,4	0,7	0,5
Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.)	1931-1960 (t1)	-21,7	-7,5	4,5	-6,8	-7,9	3,4
	1961-1990 (t2)	-21,5	-6,2	4,5	-6,2	-7,6	3,5
	Δt (t2-t1)	0,2	0,7	0,0	0,6	0,3	0,1

Ebenso wie in der Vorgebirgszone wird auch in der Hochgebirgszone das Maximum der Erwärmung in den Frühjahrsmonaten und das Minimum in den Sommermonaten erreicht. Im Zeitraum von 1991-1998 wurde jedoch eine starke Temperaturerhöhung (0,7°) in der nivalen Höhenstufe festgestellt. Dies führte zu einem verstärkten Gletscherschwund und zu einer Erhöhung der Glazialabflüsse. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die seit den 1960er Jahren festgestellte und bis heute anhaltende Tendenz der Erwärmung für alle Regionen des Tjan'-Šan' charakteristisch ist.

1.2 Niederschlag

Neben der Lufttemperatur ist der Niederschlag einer der grundlegenden Klimafaktoren, die das Abflussgeschehen eines Einzugsgebiets beeinflussen. Beide sind im Issyk-Kul'-Becken einer hohen zeitlichen Variabilität unterworfen. Vom westlichen Ufer (Rybac'e) bis zum östlichen (Tjup) wachsen die Niederschläge über eine Horizontaldistanz von 180 km auf den fünffachen Wert an. Fast ebenso stark, aber auf geringere Horizontaldistanz, ändern sie sich mit der Höhe.

Das Abflussvolumen hängt nicht nur von der jährlichen Niederschlagssumme, sondern auch vom Vergletscherungsgrad des Einzugsgebiets ab: je stärker die Vergletscherung, desto geringer ist der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss. In den Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens variiert der Korrelationskoeffizient zwischen Abfluss und den Niederschlag von 0,49 (Tjup) bis -0,01 (Colpon-Ata) (Boľšakov 1974). Im ersten Fall sind 1%, im zweiten 9,3% der Fläche vergletschert.

Mit zunehmender Höhe verändert sich der Niederschlagsgradient sehr stark, außerdem wächst er im Terskej Alatau in Richtung Westen an (Tab. 7).

Tab. 7: Vertikale Niederschlagsgradienten an der Nordabdachung des Terskej Alatau (Dikich, Michajlova 1976).

Westlicher Teil (Akterek)		Zentraler Teil (Con-Kyzyl-Suu)		Östlicher Teil (Džergalan)	
Höhe (m ü. M.)	Gradient (mm/100m)	Höhe (m ü. M.)	Gradient (mm/100m)	Höhe (m ü. M.)	Gradient (mm/100m)
1700-2150	15	1645-2150	40	1650-2100	48
2150-3540	34	2150-2650	28	2100-2400	34
		2650-3500	9	2400-3300	4
Mittelwert	29		23		21

Das starke Niederschlagszunahme mit der Höhe führt zu einer erheblichen Schneeakkumulation in der Hochgebirgszone, was nicht nur die Abflussbildung, sondern auch die Entwicklung der Vergletscherung begünstigt.

Aufgrund der orographischen Situation (Lee-Lage) fallen im Kungej Alatau weniger Niederschläge als am gegenüberliegenden Gebirgsrücken.

Die Auswertung der Niederschlagsdaten meteorologischer Stationen im Issyk-Kul'-Becken sowie die Bearbeitung der Niederschlagssummen von Hochgebirgsstationen erlauben die Berechnung mittlerer Niederschlagshöhen in der Zone der maximalen Abflussbildung (Tabelle 8).

Tab. 8: Durchschnittliche jährliche Niederschlagsmengen (mm/a) in verschiedenen Höhenbereichen (1956-1986) (Dyurgerov et al. 1995).

	Höhe (m ü. M.)					
	3000	3200	3400	3600	3800	4000
Terskej Alatau	707	754	801	848	895	942
Kungej Alatau	510	522	548	571	600	626

Die Niederschlagscharakteristik im Issyk-Kul'-Becken zeichnet sich durch einen deutlichen Jahresgang und einer hohen Jahr-zu-Jahr Variation aus (Tabelle 9).

Tab. 9: Monatliche Verteilung und Variabilität der Niederschläge.

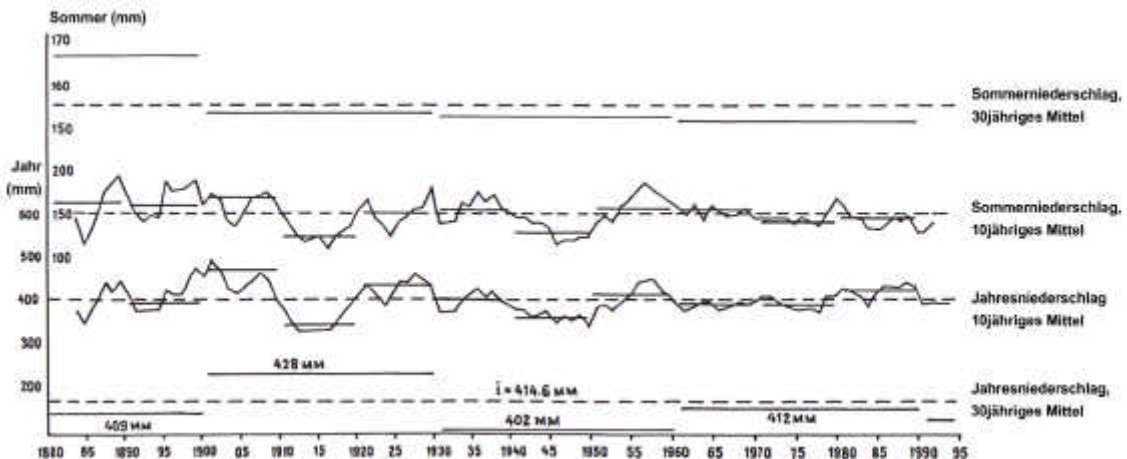
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Prževal'sk (mm)	13	11	21	40	52	56	56	54	45	32	25	15	420
Anteil (%)	3,1	2,6	5,0	9,5	12,4	13,3	13,3	12,8	10,7	7,6	5,9	3,6	100
Standard-abweichung (s)	9,9	28,0	15,3	22,0	23,4	21,8	27,4	29,7	22,0	20,8	14,8	10,2	79,8
Variations-koeffizient (CV)	0,76	0,73	0,73	0,55	0,45	0,39	0,49	0,55	0,49	0,65	0,59	0,68	0,19
Pokrovka (mm)	24	17	22	38	52	46	54	58	35	34	34	21	435
Anteil (%)	5,5	3,9	5,1	8,7	12,0	10,6	12,4	13,3	8,1	7,8	7,8	4,8	100
B.Kyzyl-Suu (mm)	18	17	35	48	83	110	121	123	73	38	32	19	717
Anteil (%)	2,5	2,4	4,9	6,7	11,6	15,3	16,9	17,2	10,2	5,3	4,5	2,6	100
Kara-Batkak (mm)	16	18	37	69	112	118	154	119	73	45	41	17	819
Anteil (%)	2,0	2,2	4,5	8,4	13,7	14,4	18,8	14,5	8,9	5,5	5,0	2,1	100

In allen Höhenlagen liegt das Niederschlagsmaximum mit 36%-49% im Sommer (Juni-August). Bei Hinzunahme des Monats Mai steigt der Wert sogar auf 48%-60%. Dies wirkt sich günstig auf die Aufrechterhaltung des Wasserangebots während der Bewässerungsperiode aus. Einen negativen Aspekt des Niederschlagsregimes stellt seine hohe Variabilität dar. Da Dürren in den Sommermonaten aber äußerst selten auftreten und selbst dann das Abflussdefizit durch eine verstärkte Gletscherschmelze kompensiert wird, verringert sich das Wasserangebot in solchen Fällen insgesamt nicht, sondern vergrößert sich sogar.

Vor dem Hintergrund einer Klimaerwärmung ist die Abschätzung von Niederschlagsveränderungen von hohem angewandtem Nutzen, vor allem da sie eine gegenläufige Tendenz zum Temperaturgang zeigen. Eine langjährige Analyse der Niederschlagsmengen und Lufttemperaturen zeigt, dass bei einem Temperaturanstieg im Sommer von 0.9°C die Niederschlagsmenge um 20% sinkt. Eine geringere Erwärmung bedingt eine entsprechend geringere Änderung des Niederschlags.

Es ist nicht gelungen, Gesetzmäßigkeiten im Wechsel von trockenen und feuchten Perioden festzustellen. Je nach Dauer der Bezugsperiode (5, 10, oder 30 Jahre) können die Niederschläge in den selben Jahren sowohl über als auch unter dem langjährigen Mittel liegen (Abb. 2).

Abb. 2: Entwicklung der jährlichen und sommerlichen Niederschlagsmengen der Station Prževal'sk bezogen auf verschiedene Bezugszeiträume.



Eine deutliche Erhöhung der Sommerniederschläge kann nur in der Periode 1901-1930 beobachtet werden, in den nachfolgenden Jahren sind die Werte durchgehend niedriger als der langjährige Mittelwert.

Tabelle 10 stellt die Niederschlagshöhen von 30-jährigen Messreihen in unterschiedlichen Jahreszeiten und in Relation zum langjährigen Mittel dar.

Tab. 10: 30jährige Niederschlagsmittel der Stationen Prževal'sk und Tjan'-Šan' und ihre Abweichung vom langjährigen Mittel

	1882-1900		1901-1930		1931-1960		1961-1990		1991-1994		Mittel
	mm	% vom Mittel	mm	% vom Mittel	mm	% vom Mittel	mm	% vom Mittel	mm	% vom Mittel	mm
Prževal'sk (1716 m ü. M.)											
Winter	45	100	54	120	37	82,2	44	97,8	40	88,9	45
Frühling	118	100,9	117	100	116	99,1	117	100	125	106,7	117
Sommer	168	107,7	155	99,4	154	98,7	155	99,4	148	94,9	156
Herbst	78	82,1	102	107,4	96	101,1	96	101,1	94	98,9	95
Jahr	409	99,1	428	103,5	403	97,5	412	99,7	407	98,5	413
Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.)											
Winter	-	-	-	-	17,0	92,4	19,7	107,1	20,2	109,8	18,4
Frühling	-	-	-	-	78,0	102,6	77,1	101,1	54,5	71,7	76,0
Sommer	-	-	-	-	165,5	103,1	164,9	102,7	68,7	42,8	160,6
Herbst	-	-	-	-	44,2	95,1	48,9	105,2	43,3	93,1	46,5
Jahr	-	-	-	-	304,7	101,1	310,6	103,0	186,6	61,9	301,5

Mit Ausnahme der Niederschläge der Jahre 1991-1994 der Klimastation Tjan'-Šan', die außerhalb des Issyk'-Kul-Beckens im Einzugsgebiet des Naryn liegt, sind die Schwankungen gering und gehen nicht über einen Wert von 5% hinaus, weshalb man von einem stabilen Mittelwert sprechen kann.

Die Lufttemperatur hat dagegen eine größere Wirkung auf das Abflussgeschehen. Sie bestimmt sowohl die Intensität der Gletscherschmelze als auch die Verdunstungsraten über eisfreien Oberflächen.

1. Stand und Entwicklung der Vergletscherung

Die Gletscher des Issyk-Kul'-Beckens sind im Sommer eine der wichtigsten Abflussquellen für die meisten Flüsse. Die Gletscherspende erhöht den Gesamtabfluss, beeinflusst den Jahresgang und garantiert unabhängig vom Niederschlag einen Mindestabfluss.

Die derzeit andauernde Klimaerwärmung hat einen negativen Einfluss auf die Vergletscherung, was nicht nur eine neue Bewertung des Gletscherverhaltens erfordert, sondern auch die Ausarbeitung von Szenarien hinsichtlich veränderter Vergletscherungs- und Abflussbedingungen. Untersuchungen auf Gletschern (Sydykov 1975, Zabirow 1976, Dikich 1982), die in verschiedenen Bereichen des Beckens liegen und sich hinsichtlich Niederschlagsreichtum, Relief und Höhenverteilung unterscheiden, erlaubten die Aufstellung einiger Gesetzmäßigkeiten. Als Grundlage zur Erfassung der räumlichen Verteilung dient der Gletscherkatalog der UdSSR (Katalog Lednikov SSSR 1976), in welchem Daten über die Vergletscherung im Zeitraum 1956-1964 erfasst sind (Kuz'micenok 1986).

2.1 Allgemeine Charakteristika

Im Issyk-Kul'-Becken existieren 834 Gletscher, die mit einer Fläche von 650,4 km² 3% des Einzugsgebiets bedecken (Katalog Lednikov SSSR 1976). Bei der Einschätzung der Bedeutung der Gletscher für die Abflussbildung ist es notwendig, ihre morphologischen und morphometrischen Besonderheiten, insbesondere Exposition, Höhenverteilung und Schuttbedeckung zu berücksichtigen. Diese Parameter können sich sowohl positiv als auch negativ auf das Gletscherverhalten auswirken.

2.1.1 Morphologie und Morphometrie der Gletscher

Die unterschiedlichen Expositionen der Hänge und Gebirgsketten, die das Issyk-Kul'-Becken umgeben – im Süden der Kungej Alatau und im Norden der Terskej Alatau - sowie Unterschiede in der Meereshöhe und in den Niederschlagsmengen bedingen die Ausbildung unterschiedlicher morphologischer Gletschertypen in verschiedenen räumlichen Ausdehnungen.

Tab. 11: Morphologische Typen von Gletschern (>0.1 km²) im Issyk-Kul'-Becken und ihre zahlen- und flächenmäßige Bedeutung

Morphologischer Gletschertyp	Anzahl der Gletscher		Gletscherfläche	
	insgesamt	%	km²	%
Talgletscher, dendritisch	22	3,5	108,1	17,0
Talgletscher	96	15,2	234,8	36,9
Kar-Tal-Gletscher	99	15,7	111,6	17,5
Kargletscher	111	17,6	44,5	7,0
Kar-Hanggletscher	110	17,4	53,3	8,4
Hanggletscher	152	24,1	47,1	7,4
sonstige	8	1,2	11,0	1,7
Plateaugletscher	6	1,0	3,8	0,6
Tal-Jochgletscher	2	0,3	4,8	0,8
Kesselgletscher	5	0,8	3,8	0,6
Hang-Kargletscher	20	3,2	13,6	2,1
Gesamt	631	100	636,4	100

(Anm. des Bearbeiters: Die sowjetische Nomenklatur unterscheidet bei den Relieftypen Übergangsformen zwischen den Haupttypen Tal-, Kar- und Hanggletscher. Plateaugletscher entsprechen im deutschsprachigen eher den kleineren Eiskappen, Tal-Jochgletscher reichen über eine Wasserscheide hinweg und Kesselgletscher sind große Kargletscher)

Den Grundtyp der Vergletscherung bilden Talgletscher mit ihren Übergangsformen. Diese Gletscher machen 34,4% aller Gletscher aus und nehmen 71,4% der gesamten Fläche ein. Ihre durchschnittliche Größe beträgt 2,1 km², ihre Länge übersteigt einen Kilometer. Die maximale Länge erreicht mit 7,5 km der Turgen'-Aksu. Am häufigsten verbreitet sind mit einem Anteil von 59,1% Kar- und Hanggletscher. Sie bedecken aber aufgrund ihrer geringen mittleren Ausdehnung von nur 0,39 km² lediglich 22,8% der Fläche. Die übrigen Gletschertypen nehmen 6,5% der Gesamtzahl und 5,8% der Gesamtfläche ein, ihre durchschnittliche Ausdehnung beträgt 0,9 km².

Insgesamt ist die Variation der Gletscherfläche nicht sehr stark. Größer als 10 km² ist nur der Gletscher Konorylen (11 km²), im Einzugsgebiet des Akterek (westlicher Teil

des Terskej Alatau) gelegen. Die Gletscher mit einer Ausdehnung unter einem km² stellen 79% der Gesamtanzahl.

Tab. 12: Anzahl der Gletscher nach Größenklassen

Fläche (km ²)	Anzahl	%
< 0,1	203	24,3
0,1-0,5	318	38,1
0,6-1,0	139	16,7
1,1-3,0	130	15,6
3,1-6,0	33	4,0
6,1-10,0	10	1,2
> 10	1	0,1
Gesamt	834	100

Verteilung der Gletscher in den Teileinzugsgebieten

Eine Eigentümlichkeit der Hydrographie des Issyk-Kul'-Beckens ist das Fehlen einer durchgehenden Wasserader, die eine Umverteilung des Wasserangebots erlauben und somit der Entstehung von Überschuss- und Defizitgebieten entgegenwirken würde.

Die Hänge des Terskej Alatau und des Kungej Alatau sind von Quertälern zerschnitten, von denen jedes ein eigenständiges Einzugsgebiet bildet. Die Abflussbildung hängt von vielen Faktoren ab, in erster Linie jedoch von den Niederschlägen der Hochgebirgszone und der Vergletscherung. Die Gletscherfläche der Quertäler hängt davon ab, ob sie den Hauptkamm erreichen oder nur eine vorgelagerte Gebirgskette. Im Terskej Alatau reichen die Oberläufe der Flüsse Con-Džargylcak, Kici-Džargylcak, Akterek, Cickan, Kicine-Kyzyl-Suu, Irdyk, Džerges, Bozucuk nicht den Gebirgshauptkamm, weshalb ihre Einzugsgebiete nur eine unbedeutende Vergletscherung und eine geringe Abflussspende aufweisen.

Tab. 13: Anzahl (n) und Fläche (F, in km²) der Gletscher in den Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens (Katalog Lednikov SSSR 1976).

Terskej Alatau					Kungej Alatau				
	>0,1 km ²		<0,1 km ²			>0,1 km ²		<0,1 km ²	
	n	F	n	F		n	F	n	F
Ulachol	7	2,4	-	-	Kabyrga	7	5,7	-	-
Akterek	19	24,9	4	0,3	Coktal	9	15,4	-	-
Ak-Saj	22	46,1	-	-	Cet-Kojsu	5	4,0	-	-
Ton	24	34,9	-	-	Orto-Kojsu	15	9,3	-	-
Tosor	23	20,1	-	-	Con-Kojsu	10	6,1	-	-
Tamga	7	5,5	3	0,2	Colpon-Ata	14	10,3	-	-
Barskaun	43	34,7	25	1,4	Baktu-Dolonaty	3	1,3	-	-
Con-Džargylcak	19	12,9	4	0,2	Orto-Dolonaty	3	2,3	-	-
Kici-Džargylcak	8	8,6	-	-	Cetki-Dolonaty	2	0,4	-	-
Akterek	5	6,7	3	0,1	Con-Aksu	48	65,2	5	0,4
Cickan	1	0,6	3	0,1	Aksu	18	12,1	4	0,2
Džuuka	54	47,9	20	1,3	Bajsaur	8	4,4	-	-
Kicine-Kyzyl-Suu	9	3,5	5	0,4	Kamennaja	8	3,2	-	-
Con-Kyzyl-Suu	30	43,3	16	1,0					
Džety-Ogyz	25	33,1	16	1,4					
Irdyk	5	4,0	-	-					
Karakol	51	58,3	18	1,2					
Aksu	69	68,0	32	2,3					
Džerges	3	1,1	5	0,4					
Bozucuk	1	0,2	6	0,4					
Turgen'-Aksu	36	33,2	15	1,2					
Džergalan	8	2,5	6	0,4					
Tjup	12	4,2	13	1,1					
Gesamt	481	496,7	194	13,4	Gesamt	150	139,7	9	0,6

Aus Tabelle 13 lassen sich beträchtliche Unterschiede in der Vergletscherung zwischen den beiden Gebirgsketten ablesen. Die Gletscher des Terskej Alatau sind aufgrund ihrer nördlichen Exposition vom Gletscherschwund relativ unversehrt geblieben. Während im Kungej Alatau nur 9 Gletscher mit einer Fläche von weniger als 0,1 km² existieren, gibt es im Terskej Alatau noch 194 derart kleine Gletscher.

Die südliche Exposition des Kungej Alatau bedingt eine höhere Lage der Firnlinie (3989 m ü. M.) im Vergleich zum Terskej Alatau (3863 m ü. M.), was zu intensiverer

Schnee- und Eisschmelze und zu einem stärkeren Rückschmelzen der Gletscher führte.

Höhenverteilung von Gletscherfläche und –volumen

Für eine sinnvolle und nachhaltige Nutzung der Gletscherwasserressourcen ist es notwendig, den Umfang des Eisvorrats und seine Verteilung mit der Höhe zu erfassen. Es existieren sehr viele elektromagnetische Eisdickenmessungen von Gletschern im Tjan'-Šan', die es ermöglichen, einen Zusammenhang zwischen Gletschervolumen (V) und Gletscherfläche (F) herzustellen.

Auf der Grundlage der Näherungsfunktion $V=aF^b$ existiert eine Reihe von Formeln, die sich lediglich in den Werten des Koeffizienten a und der Potenz b unterscheiden. In den meisten Fällen sind diese Unterschiede durch den Umfang des untersuchten Gletschers oder durch die Anzahl der Messungen bedingt und es ist schwierig, einer Methode den Vorzug zu geben. In dieser Arbeit wird das Gletschervolumen nach der Formel von Erasov (1968) berechnet:

$$V = 0,027 \times F^{1,5}$$

Nach dieser Formel beträgt das Volumen ohne Berücksichtigung der Gletscher, die kleiner als 0,1 km² sind, 25,953 km³ und mit deren Berücksichtigung 26,783 km³. Nach Berechnungen von Kuz'micenok (1986) besitzen die 834 Gletscher des Issyk-Kul'-Beckens ein Volumen von 29,443 km³. Fläche und Volumen der Gletscher sind folgendermaßen über die Höhengürtel verteilt.

Tab. 14: Verteilung der Gletscherfläche (F, km²) und des Gletschervolumens (V, km³) nach der Höhe. Berücksichtigt sind nur Gletscher mit einer Fläche über 0,1 km².

Höhenbereich (m ü. M.)	Terskej Alatau		Kungej Alatau		Summe		Anteil an Gesamtvergletscherung	
	F (km ²)	V (km ³)	F (km ²)	V (km ³)	F (km ²)	V (km ³)	F (%)	V (%)
3000-3100	0,29	0,015			0,29	0,015	0,1	0,1
3100-3200	1,48	0,080			1,48	0,080	0,3	0,2
3200-3300	2,46	0,133			2,46	0,133	0,5	0,4
3300-3400	5,72	0,327	0,69	0,052	6,41	0,379	1,5	1,0
3400-3500	12,15	0,710	2,42	0,160	14,57	0,870	3,3	2,3
3500-3600	22,17	1,179	3,99	0,212	26,16	1,391	5,4	4,1
3600-3700	39,34	1,775	7,09	0,316	46,43	2,091	8,1	7,3
3700-3800	54,60	2,082	15,31	0,570	69,91	2,652	10,2	11,0
3800-3900	64,18	2,262	21,93	0,717	86,11	2,979	11,5	13,5
3900-4000	62,75	2,244	24,81	0,766	87,56	3,010	11,6	13,6
4000-4100	57,39	2,134	21,45	0,691	78,84	2,825	10,9	12,4
4100-4200	49,48	1,931	15,59	0,525	65,07	2,456	9,4	10,2
4200-4300	41,72	1,749	9,48	0,360	51,20	2,109	8,1	8,0
4300-4400	31,69	1,444	6,70	0,288	38,39	1,732	6,6	6,0
4400-4500	21,03	1,025	4,83	0,235	25,86	1,260	4,9	4,1
4500-4600	14,7	0,763	3,61	0,197	18,31	0,960	3,7	2,9
4600-4700	9,76	0,547	1,40	0,070	11,16	0,617	2,4	1,7
4700-4800	3,54	0,223	0,42	0,017	3,96	0,240	0,9	0,6
4800-4900	1,02	0,066			1,02	0,066	0,2	0,2
4900-5000	0,40	0,026			0,40	0,026	0,1	0,1
5000-5100	0,30	0,022			0,30	0,022	0,1	0,1
5100-5200	0,30	0,022			0,30	0,022	0,1	0,1
5200-5300	0,24	0,18			0,24	0,018	0,1	0,1
Summe	496,71	20,777	139,72	5,176	636,43	25,953	100	100

Trotz der extremen Ungleichverteilung lassen sich einige Gesetzmäßigkeiten erkennen. Insgesamt konzentrieren sich im Issyk-Kul'-Becken 11,1% der vergletscherten Fläche im Höhenintervall zwischen 3000 und 3600 m ü. M., 69,8% befinden sich zwi-

schen 3600 und 4300 m ü. M. und 19,1% des Eises befinden sich in der Gipfelregion über 4300 m ü. M.

Hinsichtlich der Lebenserwartung der Gletscher unterscheidet sich der Terskej Alatau deutlich vom Kungej Alatau. Gegenwärtig entspricht das Verhältnis zwischen Akkumulations- und Ablationsflächen im Terskej Alatau 1,78, im Kungej Alatau hingegen 0,90. Im Terskej Alatau wird das Problem der Abflussdezimierung noch lange nicht akut werden, im Kungej Alatau wird jedoch bereits in den nächsten 10 bis 15 Jahren eine Verringerung des Wasserangebots einsetzen.

Verteilung der Gletscher nach der Exposition

Die ungleiche Vergletscherung an den Hängen mit unterschiedlicher Exposition ist durch die variierende Intensität der Strahlung bedingt. Der entscheidende Faktor ist dabei die Hangneigung und die damit unmittelbar verknüpfte Sonneneinstrahlung. Bei einer Neigung von 10° bis 20° erhalten südlich ausgerichtete Hänge August 22-39% mehr Sonneneinstrahlung als nördliche Expositionen (Tab.15).

Tab. 15: Tägliche Sonneneinstrahlung auf Hängen unterschiedlicher Exposition und Neigung (MJ/m²).

	Süden		Westen-Osten		Norden	
	10°	20°	10°	20°	10°	20°
Juni	25,5	25,8	24,0	23,8	22,5	21,3
Juli	23,4	23,7	22,1	21,9	20,3	18,5
August	21,8	22,4	20,1	19,9	17,9	16,1

Tabelle 15 gibt die auf unterschiedlich exponierte Gletscheroberflächen auftreffende Wärme wieder, welche die unteren Verbreitungsgrenzen von Gebirgsgletschern und die Höhenlage der Gleichgewichtslinie festlegt. Das Ergebnis ist die unterschiedliche Vergletscherung verschieden exponierter Hänge. Für den Terskej Alatau und den Kungej Alatau sind diese Verbreitungsmuster in Tabelle 16 dargestellt.

Tab. 16: Verteilung der Gletscher nach ihrer Exposition.

	Nord		Süd		Ost		West	
	Zahl	%	Zahl	%	Zahl	%	Zahl	%
Terskej Alatau	369	77,0	33	6,9	34	7,1	43	9,0
Kungej Alatau	31	20,7	97	64,7	19	12,6	3	2,0
Gesamt	400	63,6	130	20,7	53	8,4	46	7,3

2.1.2 Massenhaushalt der Gletscher

Die Vergletscherung und ihre Entwicklung werden durch die Akkumulation und Ablation von Schnee und Eis bestimmt. Diese beiden Größen bestimmen die Gletschermassenbilanz.

Akkumulation

Die Bildung einer stabilen Schneedecke beginnt an der Gletscherzunge Ende August bis Mitte September. In einigen Fällen kann der Schneefall jedoch auch in den ersten Oktobertagen beginnen. Oberhalb der Firmlinie, die auf Gletschern auch Gleichgewichtslinie heißt und die das Nährgebiet vom Zehrgebiet trennt, wird das ganze Jahr über Schnee akkumuliert.

Die Schneedecke erreicht im November auf dem mittleren Teil der Gletscherzunge eine durchschnittliche Höhe von 55 cm. Danach wächst sie monatlich um 9-12 cm und erreicht Mitte April ihr Maximum von 103 cm. Abhängig von der Zugänglichkeit des jeweiligen Tals für feuchte Luftmassen kann die Schneehöhe aber beträchtlich variieren. Maximal ist sie auf Gletschern, die sich meridional erstrecken, minimal auf solchen, die west-ost orientiert liegen.

Tab. 17: Schneehöhen auf Gletschern im Con-Kyzyl-Suu-Tal (Terskej Alatau), in cm.

Gletscher	Exposition	Höhenbereich der Gletscherzunge			mittlere Schneehöhe
		unterer	mittlerer	oberer	
Kara-Batkak	N	113	122	165	133
Ajlama	NNW	95	96	118	100
Kel'dyke	W	60	92	63	72
Ašuter	NO	86	102	100	96

Aufgrund der starken Umverteilung des Schnees durch Wind gibt es keine allgemeingültigen Höhengradienten. Bei den Werten aus Tabelle 17 betrug die Höhendifferenz der Messungen 300 m., sie werden noch durch genauere Schneemessungen auf dem Gletscher Nr. 131 gestützt (Tabelle 18).

Tab. 18: Mächtigkeit der Schneedecke in verschiedenen Höhen auf dem Gletscher Nr. 131 (Barskaun-Becken).

Höhenintervall	Mittlere Schneehöhe (cm)	
	1988	1989
3850-3950	76	92
3950-4000	105	101
4000-4100	118	125
4100-4200	90	99
4200-4300	81	118
4300-4350	108	63

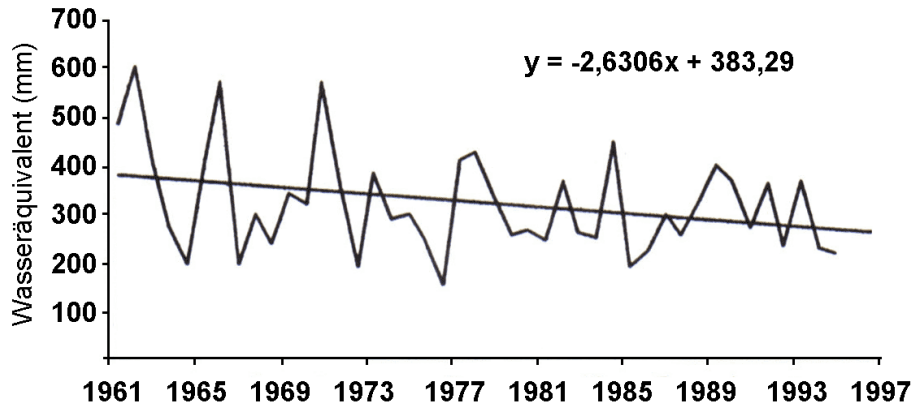
Für das gesamte Issyk-Kul'-Becken ist eine hohe Gleichmäßigkeit in der Schneedeckenmächtigkeit charakteristisch. Bei Messungen, die 1966 zur gleichen Zeit auf den Gletscherzungen der Gletscher Kara-Batkak und Turgen' Aksu (östlicher Teil des Terskej Alatau) durchgeführt wurden, betrugen die Schneehöhen 52 und 48 cm. Im Höhenbereich zwischen 3500 und 3600 m ü. M. war die Schneeschicht 100 bzw. 74 cm mächtig. Auf einer Höhe von 3890 m ü. M. wurde auf dem Gletscher Turgen' Aksu eine Höhe von 126 cm gemessen, das gleiche Ergebnis erhielt man auf dem Gletscher Kulagan-Taš, der im Kopfeinzugsgebiet des Con-Aksu am Südhang des Kungej Alatau liegt. Im April des Jahres 1971 betrug die Schneehöhe auf dem Kara-Batkak (3505 m ü. M.) 135 cm und auf dem Kulagan-Taš (3600 m ü. M.) 150 cm. Unter Berücksichtigung des Höhenunterschieds sind die Ergebnisse vergleichbar.

Unter hydrologischem Aspekt ist jedoch nicht nur die Höhe der Schneedecke von Bedeutung, sondern noch viel mehr ihr Gehalt an festem und flüssigem Wasser, das sogenannte Wasseräquivalent (WE). Zwischen 1957 und 2000 betrug das mittlere Wasseräquivalent der Schneedecke auf der Zunge des Kara-Batkak 326 mm. Maximal wurden 603 mm WE erreicht, das Minimum lag bei 157 mm WE. Auf längere Sicht zeichnet sich eine Verringerung der Schneevorräte ab (Abbildung 3).

Für den Gletschermassenhaushalt ist dieser Prozess äußerst negativ, da er nicht nur die Schneeakkumulation verringert, sondern auch zu einem früheren Beginn der Eisschmelze führt und damit die Schmelzperiode verlängert.

Im Akkumulationsgebiet, wo das ganze Jahr hindurch Schnee angehäuft wird, fallen etwa 700-900 mm Niederschlag in fester Form.

Abb. 3: Entwicklung maximaler Wasseräquivalente der Schneedecke auf dem mittleren Teil des Kara-Batkak-Gletschers.



Ablation

Auf den Gletschern beginnt die Schneeschmelze, wenn die Lufttemperaturen 0°C übersteigen, wobei es zu Beginn (erste 10-15 Tage) noch nicht zur Entstehung von Abfluss kommt. Das Schmelzwasser sickert zunächst von der Oberfläche in die Schneedecke, gefriert in tieferen Schichten erneut und kann über der Eisoberfläche aufgefrorenes Schmelzwassereis, sogenanntes Aufeis (superimposed ice), bilden. Der Abfluss aus der Schneedecke beginnt erst nach einer dauerhaften Wärmeperiode. Im Mittel beträgt die Menge des Schmelzwassers 4,7 mm je Gradtag (positives Tagesmittel der Lufttemperatur), die Schwankungen liegen zwischen 3,2 und 7,3 mm/(K*d). Bei einer genauen Vorhersage der Lufttemperaturen kann man mit diesen Angaben den Zeitpunkt des Beginns und die Intensität von Schmelze und Abfluss prognostizieren.

Die Klimaerwärmung äußert sich nicht nur in der Erhöhung der Temperatur, sondern auch in Veränderungen der Schneevorräte. Im Zeitraum von 1981 bis 2000 reduzierte sich die Schneeakkumulation um 4,2%, von 1991 bis 2000 um 9%.

Die Eisschmelze beginnt sofort nach dem Verschwinden der winterlichen Schneedecke und dauert bis zu deren erneuten Bildung an. Zunächst schmilzt die 10 bis 20 cm dicke Schicht des Aufeises und danach das eigentliche Gletschereis. Die Schmelzrate wird durch die Energiebilanz bestimmt, die folgendermaßen dargestellt werden kann (Kotljakov 1984):

$$M \cdot l_M = R + H \pm l_v E - G$$

M:	Schmelze
l_M :	spezifische Schmelzwärme
R:	Strahlungsfluss
H:	fühlbarer Wärmefluss
l_v :	spezifische Verdampfungswärme
E:	latente Wärme
G:	Wärmestrom in tiefere Schichten

Die mittlere Wärmezufuhr auf die Gletscheroberfläche wird auf 12,4 MJ/m² geschätzt. 82% davon stammen aus der Strahlungsbilanz, 17% aus dem fühlbaren Wärmestrom und nur 1% der Energie wird durch Kondensation und Regenniederschläge bereitgestellt.

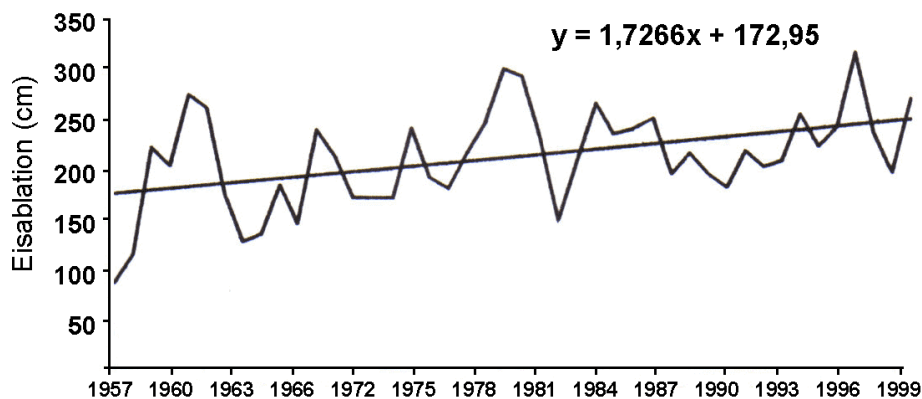
Der dominierende Anteil der Strahlungsbilanz bedeutet eine starke Abhängigkeit der Eisschmelze von der Sonneneinstrahlung. Für die zentralasiatischen Gletscher beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen Eisschmelze und Sonneneinstrahlung 0,70-0,99. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Schmelze und dem absorbierten Teil der Strahlung liegt zwischen 0,69 und 0,87 (Konovalov 1979). Im Issyk-Kul'-Becken liegt dieser Wert bei 0,8. Wegen der seltenen Verfügbarkeit von Strahlungsmessdaten aus der Hochgebirgszone kann diese hohe Korrelation jedoch kaum für die Berechnung der Schmelze genutzt werden. Aus diesem Grunde wurde der Zusammenhang zwischen den Schmelzraten und den Mitteltemperaturen unterschiedlich langer Zeitabschnitte (Tagesmaximum, 12 Stunden, 24 Stunden, Pentade, Dekade, Monat) untersucht.

Es wurde festgestellt, dass die mittlere Lufttemperatur und die Eisschmelze eines Zeitraum von mehr als 5 Tagen sehr eng miteinander verbunden sind, der Korrelationskoeffizient war in allen Fällen größer als 0,8.

Auf den Gletschern des Terskej Alatau fällt in einer Höhe von 3400 m ü. M. im Durchschnitt 374 mm Schnee im Winter. Um diesen zu schmelzen, ist bei einem Gradtagfaktor von 5,4 mm/(K*d) eine Summe positiver Temperaturen von 69,3°C nötig. Diese wird im Mittel am 28. Juni erreicht, am gleichen Datum beginnt dann die Eisschmelze. Unter Berücksichtigung der Höhengradienten von Niederschlag und Temperatur, lässt sich die Firnlinie als die Höhenlage, in der sich Akkumulation und Schmelze die Waage halten, bestimmen. Im Terskej Alatau liegt die so berechnete mittlere Höhenlage der Firnlinie bei 3835 m ü. M., im Kungej Alatau bei 4170 m ü. M.

Langjährige Beobachtungen der Eisschmelze auf dem Kara-Batkak (1957-2000) sowie episodische, halbstationäre Untersuchungen auf anderen Gletschern des Issyk-Kul'-Beckens lassen darauf schließen, dass der Prozess der Ablation überall in der Region ähnlich verläuft. Abhängig vom Temperaturverlauf, der die Intensität der Schmelze bestimmt und von der Niederschlagscharakteristik, die über die Dauer von Schnee- und Gletscherschmelze entscheidet, variiert die jährliche Ablation in recht weiten Grenzen von 90 cm bis 314 cm. Der Durchschnittswert liegt bei 212 cm, und es besteht eine Tendenz zu einer Erhöhung der Schmelzintensität, was zu einem Anstieg des Gletscherabflusses führt (Abbildung 2).

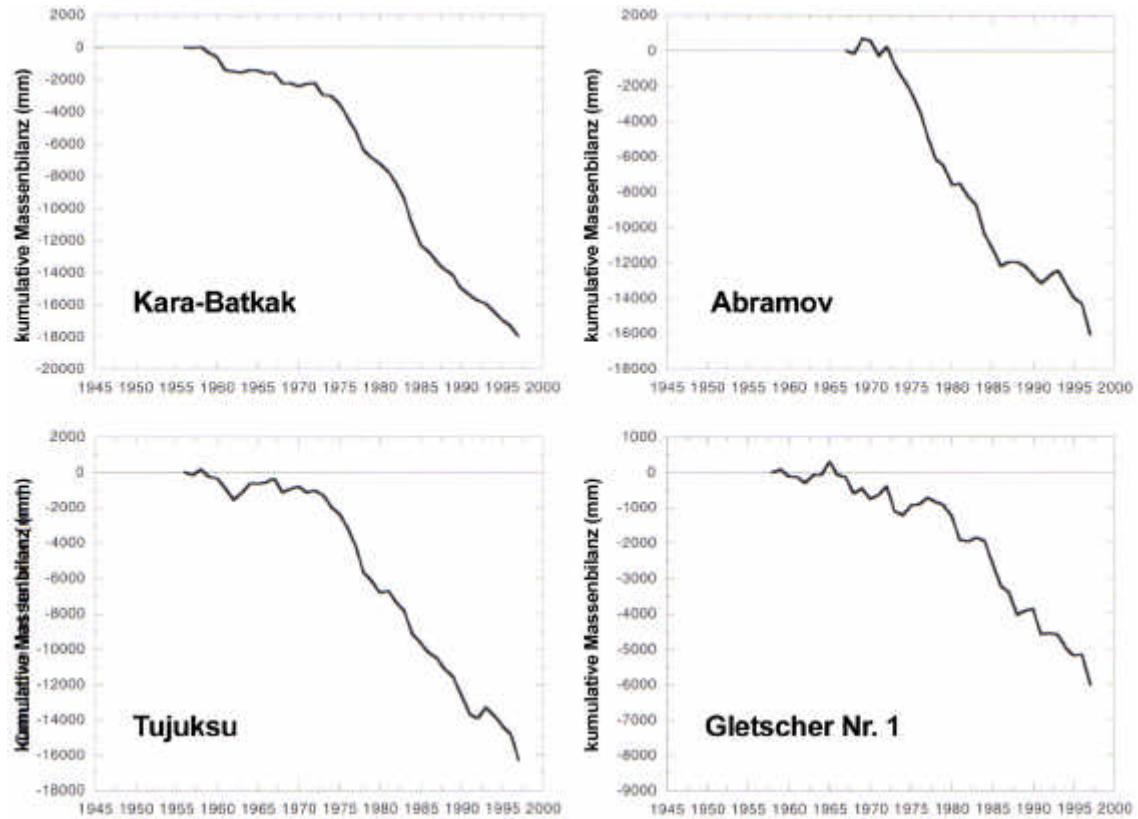
Abb. 4: Entwicklung der Eisschmelze des Kara-Batkak (1957-2000).



Nettobilanz

Die Verringerung der jährlichen Schneeakkumulation und die Erhöhung der Schmelzintensität wird bei allen Kenngrößen der Vergletscherung ersichtlich. Ein objektives Kriterium für den Zustand der Vergletscherung ist die Gletschermassenbilanz, besonders bei der Betrachtung größerer Zeiträume. Durch die Analyse langjähriger Massenbilanzreihen aus verschiedenen Gebieten des Tjan'-Šan' lässt sich auf die Gesamtentwicklung schließen (Abbildung 3).

Abb. 5: Kumulative Massenbilanzkurven von Gletschern aus dem Tjan'-Šan' und dem Alaj (Quelle: WGMS 1999). 1 – Kara-Batkak (Terskej Alatau), 2- Abramov (Alaj), 3 – Zentraler Tujuksu (Zailiskij Alatau), 4 – Gletscher Nr. 1 (Tianger).



Die Massenbilanzmessungen auf dem Kara-Batkak (Tabelle 19) lassen Zustand und Entwicklung der Vergletscherung im Issyk-Kul'-Becken im Zeitraum 1957-1998 erkennen.

Tab. 19: Spezifische Massenbilanzen (B) des Kara-Batkak (mm).

Jahr	B	Jahr	B	Jahr	B	Jahr	B
1957	-30,7	1968	-611,8	1979	-500,0	1990	-788,0
1958	61,4	1969	0,0	1980	-366,2	1991	-398,0
1959	-344,2	1970	-182,0	1981	-447,3	1992	-352,0
1960	-291,6	1971	146,9	1982	-782,9	1993	-185,0
1961	-809,2	1972	52,6	1983	-947,3	1994	-505,0
1962	-85,5	1973	-752,2	1984	-1572,3	1995	-515,0
1963	-39,2	1974	-50,4	1985	-1291,7	1996	-373,0
1964	144,7	1975	-473,7	1986	-392,0	1997	-648,0
1965	-41,6	1976	-850,8	1987	-682,0	1998	-360,0
1966	-157,9	1977	-864,0	1988	-456,0		
1967	10,9	1978	-1175,4	1989	-396,0		

Die Entwicklung der Vergletscherung verlief sehr ungünstig, von den 42 Beobachtungsjahren weisen nur 5 Jahre keine negative Bilanz auf. Seit 1973 liefern die Messungen durchgehend negative Bilanzen. Die Eisoberfläche ist dabei im Mittel um 18,3 m eingesunken. Im Jahr 1957 betrug die durchschnittliche Gletscherdicke auf 3415 m ü. M. noch 49 m, bis zum Jahr 1998 verlor der Gletscher 36,7% seiner Masse. Morphometrisch verdeutlichte sich dies im Absinken der Oberfläche im Verhältnis zu den seitlichen Moränen. Die lange Folge von negativen Gletschermassenbilanzen führte auch zu einer Verkleinerung der Gletscherfläche.

Natürlich unterliegt die Massenbilanz auch einem Höhengradienten. Sie kann in den oberen Bereichen der Gletscher sowohl positiv als auch negativ sein, in Abhängigkeit von der maximalen Gletscherhöhe und den klimatischen Bedingungen des jeweiligen Jahres. Ein Beleg hierfür sind die Massenbilanzmessungen auf dem Gletscher Nr. 131, der im Barskaun Tal auf der nördlichen Abdachung des Terskej Alatau liegt.

Tab. 20.: Akkumulation (Ak), Ablation (Ab) und Nettobilanz (B) in verschiedenen Höhenstufen auf dem Gletscher Nr. 131 (mm).

Höhenintervall (m ü. M)	Fläche (km²)	1987-1988			1988-1989		
		Ak	Ab	B	Ak	Ab	B
4350-4430	0,065	428	-527	-99	609	-116	493
4200-4350	0,122	434	-854	-420	486	-430	53
4100-4200	0,084	554	-1299	-754	515	-974	-459
4000-4100	0,178	576	-1426	-850	635	-1301	-666
3950-4000	0,028	486	-1580	-1094	507	-1380	-873
3850-3950	0,034	466	-2303	-1836	324	-1413	-1089
3850-4430	0,511	507	-1219	-712	548	-902	-354

Der Temperaturrückgang mit zunehmender Höhe bewirkt eine Abnahme der Ablation in gleicher Richtung, während die Akkumulation keiner offensichtlichen Gesetzmäßigkeit unterliegt. Die resultierenden Bilanzwerte nehmen dann entsprechend mit der Höhe zu.

Die wichtigsten bestimmenden Faktoren für den Massenhaushalt sind die Jahresmitteltemperatur und der Jahresniederschlag. Das langjährige Temperaturmittel für Juli bis August liegt am Kara-Batkak bei 4,8°C, in den fünf positiven Bilanzjahren lag es zwischen 4,4°C und 2,8°C. In diesen Jahren war der Jahresniederschlag nur einmal um 3,4% geringer als normal (801 mm), in den anderen Jahren lag er 5-19% über dem Mittel.

2.1.3 Gletscherschwankungen

Seit den 1870er Jahren vollzieht sich ein Rückschmelzen der Gletscher, das nur von kurzen Vorstoßperioden unterbrochen wurde. Bereits 1932 beschrieb S.V. Kalesnik die Gletscher des inneren Tjan'-Šan', als „anormal und sterbend“ (Dikich, Kuz'micenok 1977). Diese Beschreibung trifft auch auf die Gletscher des Issyk-Kul'-Beckens zu. Luftaufnahmen (Kuz'micenok 1986) aus den Jahren 1943 und 1977 zeigen, dass sich von 82 analysierten Gletschern auf der Nordabdachung des Terskej Alatau lediglich ein Gletscher vergrößerte und neun unverändert blieben, während alle anderen um 10 bis 159 m zurückschmolzen. Der Kara-Batkak Gletscher schrumpfte in der Zeit von 1991 bis 1997 jährlich um 6 bis 12,4 m.

Von 22 Gletschern im zentralen Bereich des Terskej Alatau schmolzen zwischen 1980 und 1995/7 Gletscher um 90 bis 100 m, 6 Gletscher um 60 bis 89 m und 9 Gletscher um 25 bis 59 m zurück. Die unterschiedliche Intensität des Gletscherschwunds liegt in morphologischen Gründen sowie in unterschiedlichen Höhererstreckungen und Expositionen begründet. Der mittlere jährliche Längenverlust beträgt bei Talgletschern 6,2 m, Kargletschern 3,1 m und Hanggletschern 2,5 m.

Das Ausmaß der Degradation wird durch einen Anstieg der Sommertemperatur und Veränderungen des Jahresniederschlags bestimmt. Die gegenwärtige Änderung dieser Klimawerte stellt sich folgendermaßen dar:

Tab. 21: Entwicklung (Trend) der Sommertemperatur (t°) und des Jahresniederschlags (N).

Station	Höhe (m ü. M.)	Zeitraum	t° ($^{\circ}\text{C}$)	Trend ($^{\circ}\text{C/a?}$)	N (mm)	Trend (mm/a?)
Kyzyl-Suu	1740	1950-2000	14,8	0,015	408,1	0,66
San-Taš	2320	1963-2000	10,7	0,019	912,1	3,18
Con-Ašu	2800	1970-2000	5,8	0,024	583,9	-1,838
Tjan'-Šan'	3614	1930-2000	1,9	0,014	307,8	-1,095

In den letzten 20 Jahren und vor allem in den letzten 10 Jahren nahm die Geschwindigkeit der Erwärmung zu. Im Vorgebirge des Issy-Kul'-Beckens lag der Trend im Zeitraum 1981-2000 bei $0,023^{\circ}\text{C/a}$ und im Zeitraum 1991-2000 bei $0,058^{\circ}\text{C/a}$, in der Hochgebirgszone lagen die entsprechenden Werte bei $0,073^{\circ}\text{C/a}$ und $0,139^{\circ}\text{C/a}$.

Wenn diese Trends auch in Zukunft anhalten, kommt es bis zum Jahr 2025 zu einer Erwärmung in der Hochgebirgszone um $1,8-3,5^{\circ}\text{C}$. Dieser Temperaturanstieg würde die Vergletscherung drastisch reduzieren (Tab. 22).

Tab. 22: Prognostizierte Entwicklung der Gletscherfläche (F) und des Gletschervolumens (V) im Issyk-Kul'-Becken bei einer Klimaerwärmung um 2°C (Dikich et al. 1999). Berücksichtigt wurden nur Gletscher mit einer Mindestfläche von 0,1 km².

	Heutiger Zu- stand		Klimaerwärmung +2°			Rest (%)	
	F (km²)	V (km³)	F (km²)	V (km³)	Höhe der Glet- scherzunge (m ü. M)	F (km²)	V (km³)
Kungej Alatau	139,7	5,167	107,0	3,799	4160	76,6	73,5
Terskej Alatau	496,7	20,777	158,7	7,978	3830	31,9	38,4
Gesamt	636,4	25,944	265,7	11,777	3902	41,8	45,4

Natürlich hat der enorme Flächen- und Massenverlust Auswirkungen auf das Abflussverhalten und damit auch auf die Seespiegelhöhe des Issyk-Kul', auf wirtschaftliche Aktivitäten und möglicherweise auch auf den gesamten naturräumlichen Charakter des intramontanen Beckens.

3. Abflussbildung in den Teileinzugsgebieten

Die intramontane Lage und Abflusslosigkeit des Issyk-Kul' haben einen lokalen Wasserkreislauf zur Folge. Dieser ist zwar nicht geschlossen, da über die freie Atmosphäre Luftfeuchtigkeit an- und abtransportiert wird, doch zumindest ein Teil des Wassers, das von der Seeoberfläche verdunstet, fällt über dem Einzugsgebiet wieder als Niederschlag aus, durchläuft den Kreislauf ein weiteres Mal und macht die Region unabhängiger gegenüber advektiv herangeführter Feuchtigkeit .

Gletscherschmelzwasser ist ein fester Bestandteil des sommerlichen Abflusses, weshalb Fragen nach dem Gletscherverhalten sowie dem Stand und der räumlichen Verteilung der Vergletscherung von enormer hydrologischer Bedeutung sind. Das Gletscherverhalten und seine bestimmenden Faktoren wurden in den vorangegangenen Abschnitten betrachtet. In diesem Kapitel wird der Abfluss und sein Jahresgang analysiert sowie die Gletscherschmelze und ihr Anteil am Gesamtabfluss abzuschätzen versucht. Gegenwärtig wird der Abfluss des Beckens auf 3,72 - 3,91 km³/Jahr (118 - 124 m³/s) geschätzt (Alamanov et al. 2000). Der Gesamtabfluss setzt sich aus dem oberirdischen

Abfluss, der mit 120 m³/s angegeben wird und dem unterirdischem Abfluss von 4 m³/s zusammen. Hierbei muss erwähnt werden, dass der anthropogene Wasserverbrauch im Becken praktisch in allen Bereichen verringert wurde. Nach Angaben des Wasserwirtschaftsdepartments und dem Staatlichen Kirgisischen Institut für Landnutzung und –bewertung (KYRGYZGIPROZEMA) (Alamanov et al. 2000) verringerte sich der Jahresverbrauch im Zeitraum von 1990 bis 1999 von 1137,94 Mio. m³ auf 453,5 Mio. m³. Der Bedarf der Haushalte sank dabei von 21,29 Mio. m³ auf 6,85 Mio. m³ und derjenige der Industrie von 13,8 Mio. m³ auf 10,6 Mio. m³. Der größte Anteil geht jedoch auf den Landwirtschaftssektor zurück. In einzelnen Regionen ging die Wasserentnahme um 80% zurück. In Aksujskij Gebiet wurden 1990 411,9 Mio. m³ Wasser entnommen, 1999 verringerte sich der Wert auf 81,3 Mio. m³.

Die Lage im Gebirgsinneren und die Periodizität der atmosphärischen Zirkulationsprozesse – der niederschlagssenkende Einfluss der sibirischen Antizyklone im Winter und das Vorherrschen westlicher, nordwestlicher und feuchter südlicher Luftströmungen im Sommer – bedingen die winterliche Trockenheit und das Maximum der Niederschläge im Sommer. Diese saisonale Niederschlagsverteilung lässt im ganzen Issyk-Kul'-Becken ein sommerliches Abflussmaximum entstehen. Der Beitrag des Sommerabflusses zum Jahresabfluss ist aber in den einzelnen Flüssen verschieden und hängt von der räumlichen Verteilung der Niederschlagsmengen sowie von der Höhenerstreckung des Einzugsgebietes und dessen Vergletscherung ab.

3.1 Gesamtabfluss

An der Entstehung des oberirdischen Abflusses sind im Untersuchungsgebiet sowohl feste und flüssige Niederschläge als auch Gletscherschmelze und Grundwasser beteiligt. Der jeweilige Anteil hängt vom Vergletscherungsgrad und vom Jahresniederschlag ab. Die jährliche Niederschlagsmenge in der Hochgebirgszone ändert sich von West nach Ost von 680 mm am Turasu über 880 mm am Con-Kyzyl bis auf 920 mm am Turgen'-Aksu. Im Mittelgebirgsgürtel betragen die jährlichen Niederschlagsmengen entsprechend 500, 800 und 880 mm, im Vorgebirge 260, 550 und 730 mm (Dikich, Michajlova 1976). Horizontale und vertikale Gradienten der Niederschläge und Lufttemperaturen äußern sich in der unterschiedlichen Bedeutung der verschiedenen Höhenlagen für die Abflussbildung. Feldmessungen zeigten in Höhenlagen bis 2500 m ü. M. im Sommer eine Verdunstung von 85-100% des Niederschlags (Dikich, Michajlova 1976). Niederschlagsereignisse allein lassen oberirdischen Abfluss nur bei Intensitäten ab 2 mm/min entstehen. Die Zone der aktiven Abflussbildung liegt in Höhen über 3300 m ü.

M., wo 80-87% der jährlichen Abflussmenge gebildet werden. Der Vergletscherungsgrad der Teileinzugsgebiete, der Flächenanteil an Hochgebirgslagen und das sommerliche Maximum der Niederschläge bestimmen Menge und Jahresgang des Abflusses. Dies veranschaulichen die Abflussdaten in Tabelle 23.

Tab. 23: Topographische und hydrologische Charakteristika der Teileinzugsgebiete.

Fluss (Messstelle)	Fläche > 3300 m ü. M.		Abflussmenge (Mio. m³/a)	Sommerabfluss (%)	Abfluss-spende (l/s km²)	Monat des max. Abflusses
	(km²)	(%)				
Tjup (Station Tjup)	146,7	13	28,3	9,7	347	Mai
Bozucuk	36,6	43,5	51,2	22,3	59,3	Jun.
Karakol (Kaška-Su-Mündung)	206,0	63,4	60,4	20,9	214	Jul.
Con-Kyzyl-Suu (Waldposten)	150,8	49,9	63,1	15,8	150	Jul.
Barskaun (Sasyk-Mündung)	244,6	70,7	67,5	11,9	130	Jul.– Aug.
Ton (Station Turasu)	139,3	57,1	54,3	8,6	65,9	Aug.
Turasu (Station Ulachol)	173,5	30,8	54,4	5,4	95,3	Jul.
Toruajgyr (Kyzyl-Bulak-Münd.)	112,5	7,7	35,1	5,3	24,9	Mai-Jun.
Colpon-Ata (oberer Colpon-Ata)	60,6	54,6	48,7	11,5	40,4	Aug.
Con-Aksu (Gri-gor'evka)	192,3	62,2	55,1	16,4	160	Aug.
Ojtal (Station Ojtal)	8,3	21,9	47,2	14,0	16,7	Jun.

Der Anstieg der Niederschläge von West nach Ost und die Veränderung des Vergletscherungsgrades bedingen die unterschiedlichen Abflussspenden. Der Einfluss der abflussbildenden Faktoren ist großen räumlichen Schwankungen unterworfen.

Eine fast dreimal so hohe Abflussspende des Ojtal gegenüber dem Toruajgyr kann nur durch Niederschlagsunterschiede erklärt werden, da die Becken nicht vergletschert sind. Die Ursache für die niedrige Abflussspende des Barskaun liegt in der Orographie des Tals. Es besitzt hohe Vorgebirgsketten und nur einen schmalen Zugang für feuchte Luftmassen zum Hauptkamm, entlang dem sich die hochgelegenen Flächen erstrecken und die Hauptzuflüsse entspringen. Die Bedeutung der Vorgebirge beim Auskämmen

von Niederschlägen zeigt sich gut im Bozucuk-Becken. Hier nehmen die Gletscher eine Fläche von nur 0,6 km² ein, wegen der enormen Stauniederschläge wird jedoch die höchste Abflussspende im Issyk-Kul'-Becken erreicht.

Für Zwecke der Wassernutzung sind Flüsse mit geringer Abflussvariabilität von besonderem Wert. Während bei stark glazial geprägten Abflüssen der Variationskoeffizient (CV) zwischen 0,11 und 0,14 (Con-Kyzyl-Suu und Con-Aksu) liegt, steigt er in Einzugsgebieten mit geringer oder fehlender Vergletscherung auf 0,14 bis 0,27 (Turasu, Ojtal) (Bol'sakov 1974).

Besondere Aufmerksamkeit verdient die jährliche Verteilung der Abflussmenge, von der eine stabile Wasserversorgung abhängt. Lediglich bei den Flüssen Tjup und Toruajgyr beträgt der Abfluss in den Sommermonaten weniger als 40% des Jahresumfanges. Bei Flüssen mit einer ausgeprägten Vergletscherung im Kopfeinzugsgebiet (Karakol, Con-Kyzyl-Suu, Barskaun, Tjup, etc.) beträgt der Anteil des Sommerabflusses 48,7% (Colpon-Ata) bis 67,5% (Barskaun).

Das sommerliche Abflussmaximum kommt besonders der Bewässerungslandwirtschaft, dem Hauptwasserverbraucher, zugute.

Abhängig vom Jahresgang der Niederschläge und der Temperatur verändert sich die Abflussmenge und die Bedeutung der einzelnen Abflussquellen. Der Zeitpunkt des maximalen Abflusses liegt jedoch bei den meisten Flüssen in der Sommerzeit. Je größer der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss ist, desto geringer bleibt die Jahr-zu-Jahr Variation.

Die große Bedeutung der Meereshöhe bei der Abflussbildung zeigt sich in allen Einzugsgebieten, unabhängig vom Vorhandensein von Gletschern.

Tab. 24: Veränderung der Abflusssspende ($\text{l/s} \cdot \text{km}^{-2}$) mit der Höhe. Die Werte in Klammern wurden mit Hilfe der Formel $M_o = f(H_{cp})$ errechnet.

Region	2000 m ü. M.	2400 m ü. M.	2800 m ü. M.	3200 m ü. M.	3600 m ü. M.	4000 m ü. M.
Östl. Teil des Kungej Alatau u. Oberlauf von Tjup und Džergalan	(3,0)	(8,0)	14,4	24,0	(26,8)	(28,0)
Westl. Teil des Kungej Alatau	(0,8)	(1,8)	2,7	8,6	(20,0)	(24,8)
Östl. Teil des Terskej Alatau u. Oberläufe von Tjup u. Džergalan	(3,0)	(6,8)	(11,3)	16,8	23,4	(29,4)
Zentraler Teil des Terskej Alatau	-	(3,6)	(7,0)	13,0	25,8	(34,0)
Westl. Teil des Terskej Alatau	(0,8)	(1,6)	(4,0)	8,5	(20,0)	(23,5)

Bemerkenswert sind die äußerst niedrigen Abflussmengen in den trockenen westlichen Regionen des Issyk-Kul'-Beckens. Im allgemeinen wächst die Abflusssspende ab einer Höhe von 3,6 km deutlich an.

3.2 Die Bedeutung der Gletscher bei der Abflussbildung

Die wasserwirtschaftliche Bedeutung des Gletscherabflusses liegt unter anderem in seiner Entstehung während der Vegetationsperiode, wenn der Bedarf für landwirtschaftliche Bewässerung am größten ist. Der Jahresabfluss verändert sich mit der Höhe, was durch den Einfluss von Niederschlag und Lufttemperatur bedingt ist. Im Sommer werden die Abflussverluste aufgrund geringer Niederschlagsmengen durch die erhöhte Gletscherschmelze kompensiert. Im Untersuchungsgebiet zeigt sich eine deutliche Asymmetrie zwischen Niederschlags- und Temperaturgang. Dies wird auch aus den meteorologischen Werten aus dem Jahre 1973 (Tab. 25) deutlich. In diesem Jahr überstieg die Temperatur im Juli und August das langjährige Mittel um $1,6^{\circ}\text{C}$ bzw. $1,2^{\circ}\text{C}$, die Niederschläge lagen dagegen um 36% bzw. 50% unter dem Durchschnitt.

Tab. 25: Abflussmenge, Wasserentnahme für Bewässerung und meteorologische Bedingungen am Con-Kyzyl-Suu im Jahr 1973.

	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Jahr
Abflussmenge (m³/s)						
1973	4,01	9,55	16,8	13,1	5,99	5,02
langjähriges Mittel	4,79	9,95	13,7	12,5	5,52	4,77
Wasserentnahme (m³/s)						
Geplant	4,29	7,25	6,13	4,72	2,69	2,51
Tatsächlich	2,96	7,10	9,70	7,64	4,14	3,11
Lufttemperatur (°C)						
1973	11,4	15,7	18,7	17,6	12,5	6,9
langjähriges Mittel	11,6	14,6	17,1	16,4	12,7	6,3
Niederschlag (mm)						
1973	41	33	36	29	36	307
langjähriges Mittel	52	46	54	58	35	435

Unter den gegebenen klimatischen Bedingungen wuchs der Wasserverbrauch für die Bewässerung stark an. Dabei ist das Ausbleiben eines Wassermangels nur mit der enormen Eis- und Firnschmelze zu erklären. Im Juli und August beträgt der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss im Con-Kyzyl-Suu 63% bzw. 75%.

Im Ojtal, das keine Vergletscherung aufweist, war im Jahr 1973 der Abfluss von Mai bis September geringer als im Durchschnitt. In den Monaten Juni bis August sank die Abflussmenge im Verhältnis zum langjährigen Mittel um 50,3%, 11,5% und 45%. Eine ähnliche Situation lag auch im Jahr 1997 vor, wo die Lufttemperatur 1,7°C über und die Niederschlagsmenge 41,8% unter dem Mittel lagen. Diese Situation führte zu einer Erhöhung des Abflusses am Con-Kyzyl-Suu um 5%, während er sich am Oj um 36,3% verringerte.

Die angeführten Beispiele zeigen deutlich die Bedeutung der Vergletscherung in Jahren mit Niederschlagsdefiziten und erhöhten Temperaturwerten.

Bei früheren Untersuchungen (Bol'sakov 1974) zeigte sich die Bedeutung von Niederschlag und Lufttemperatur für die Abflussbildung bei unterschiedlich starker Vergletscherung. Es wurde festgestellt, dass bei steigendem Vergletscherungsgrad die Korrelation zwischen Lufttemperatur und Abfluss zunimmt. In den Berechnungen von Bol'sakov wurden Datenreihen bis 1966 verwendet, in der vorliegenden Arbeit wurde die Zeitreihe von 1960 bis 2000 betrachtet. Die Klimaerwärmung und das steigende Tempo der Gletscherdegradation in den letzten Jahrzehnten erfordern die Berücksich-

tigung aktueller Daten. Die Abschätzung von Abflussmengen in Einzugsgebieten, die sich hinsichtlich Niederschlag und Vergletscherung voneinander unterscheiden, ist für aktuelle Fragen der Wassernutzung von großer Bedeutung.

Die direkte Abhängigkeit der Gletscherschmelze von der Lufttemperatur lässt einen engen Zusammenhang zwischen Jahresabfluss und Jahresmitteltemperatur erwarten. In einzelnen Jahren mit hohen Niederschlagsmengen sind diese jedoch der dominierende Faktor bei der Abflussbildung, wodurch die Korrelation zwischen Lufttemperatur und Abfluss verringert wird.

Tab. 26: Korrelationskoeffizient (R^2) zwischen dem Abfluss für Juni–August (Q_s) und der Temperatur im Jahresmittel (T) und im Juli (T_{vii}) sowie den Niederschlägen von Juni–August (P_s) und Juli (P_{vii})

Fluss (Messstelle)	Met. Station	Höhe (m ü. M.)	Q_s / T	Q_s / T_{vii}	Q_s / P_s	Q_s / P_{vii}
Turasu (Ulachol)	Rybac'e	1660	-0,07	-0,04	0,14	0,15
Con-Kyzyl-Suu (Waldposten)	Pokrovka (Kyzyl-Suu)	1740	0,37	0,33	0,07	0,19
	Großer Kyzyl-Suu	2550	0,34	0,4	-0,11	0,16
Tjup (Tjup)	Prževal'sk	1716	-0,31	-0,44	0,39	0,45
Tjup (Sarytologoj)		1716	-0,35	-0,37	0,34	0,44
Turgen'-Aksu (Sägewerk)	Con-Ašu	2800	0,31	0,40	0,11	0,16
Con-Aksu (Gri-gor'evka)	Colpon-Ata	1645	0,41	0,29	-0,03	0,29

In den Einzugsgebieten mit ausgedehnter Vergletscherung sind die Korrelationskoeffizienten zwischen Abfluss und Lufttemperatur positiv. Zwischen Abfluss und Niederschlägen kann er sowohl positiv als auch negativ sein. In allen Fällen ist jedoch der Betrag der Korrelationskoeffizienten mit der Lufttemperatur höher als mit dem Niederschlag. In Flüssen mit kleiner Gletscherfläche im Einzugsgebiet (Tjup, Turasu) ist der Zusammenhang zwischen Abfluss und Lufttemperatur entgegengesetzt.

Das Niederschlagsmaximum, das in den Hochgebirgslagen im Juli erreicht wird, und sein Einfluss auf das Abflussgeschehen zeigt sich im feuchtesten, östlichen Teil des Beckens an den hohen Korrelationskoeffizienten für den Tjup.

Auf Grund der aufgezeigten Abhängigkeit der Schnee- und Eisschmelze von der Lufttemperatur und der Höhenverteilung der Vergletscherung wurde der Gletscherabfluss für alle Flüsse im Issyk-Kul'-Becken, die einen Gletscher im Einzugsgebiet haben, errechnet. Dabei versteht man unter Gletscherabfluss den gesamten Abfluss von der Oberfläche des Gletschers, der neben dem Schmelzwasser von Eis und Schnee auch flüssige Niederschläge umfasst.

Der Gletscherabfluss wurde nach der Methode, die in der Monographie „Die Vergletscherung des Tjan'-Šan'" (Dyurgerov et al. 1995) ausführlicher beschrieben wird, berechnet. Als Gletscherabfluss wird der gesamte Abfluss von vergletscherten Flächen behandelt, unabhängig, ob er von Schneeschmelze, Eisschmelze oder Niederschlag stammt. Zunächst wird für jedes Einzugsgebiet ein Niederschlagsgradient und dann über die Flächen-Höhen-Verteilung die gesamte Winterakkumulation von 15. September bis 15. Juni bestimmt, von der ein pauschaler Verdunstungsbetrag von 100 mm subtrahiert wird. Der Beginn der Eisschmelze errechnet sich durch die Temperatursumme (positive Gradtage), die nötig ist, um den Winterniederschlag zu schmelzen. Hierbei wird ein mittlerer Gradtagfaktor von 5,4 mm/(K*d) angenommen. Die Ablation selbst wird zunächst für die Höhenlage von 3400 m ü. M., der unteren Verbreitungsgrenze von Gletschern, mit Hilfe der folgenden empirischen Formel berechnet:

$$\text{Abl}_{3,4\text{km}} = (5,6T + 2,1) \cdot n$$

$\text{Abl}_{3,4\text{km}}$: Eisschmelze in der Höhe von 3400 m ü. M.

T: mittlere dekadische Lufttemperatur während der Ablationsperiode

n: Anzahl der Dekaden in der Ablationsperiode

Anschließend wird der Höhengradient der Ablation bis zur Höhenlage der Firnlinie im Spätsommer, wo die Eisschmelze gleich Null ist, bestimmt und damit die gesamte Jahresablation für 100m Höhenintervalle berechnet. Der Abfluss aus dem Nährgebiet wird bis zu einer Obergrenze von 5000 m ü. M., oberhalb derer keine Schmelze mehr angenommen wird, mit 50% der Akkumulation angesetzt. (Dyurgerov et al. 1995). Der so berechnete Gletscherabfluss in den Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens ist in Tabelle 27 aufgeführt.

Tab. 27: Gletscherabfluss und Gesamtabfluss (Mio. m³/a) im Issyk-Kul'-Becken.

	Vergletscherte Fläche	Abfluss		Gletscherabfluss		
		Jahr	Sommer	Jahr	Anteil im Jahr (%)	Anteil im Sommer (%)
Nordabdachung des Terskej Alatau						
Ulachol	2,4	95,3	35,2	2,02	2,1	5,7
Akterek	24,9	91,5	13,0	21,41	23,4	-
Ak-Saj	46,1	92,7	27,9	44,30	47,8	-
Ton	34,9	65,2	24,3	34,54	53,3	-
Tossor	20,1	72,5	27,5	18,25	25,2	66,3
Tamga	5,5	35,0	18,8	5,80	16,6	30,8
Barskaun	34,7	130,0	60,0	27,14	20,9	45,2
Con-Džargylcak	12,9	70,0	28,8	-	-	-
Kici- Džargylcak	8,6	37,2	11,8	6,65	17,9	56,3
Akterek, Cickan	7,3	50,6	18,8	5,48	10,8	29,1
Džuuka	47,9	195,2	79,8	35,40	18,1	44,3
Kicine-Kyzyl-Suu	3,5	39,7	16,0	2,28	5,7	14,3
Con-Kyzyl-Suu	43,3	150,4	64,8	44,75	29,7	69,0
Džety-Oguz	33,1	181,9	70,7	32,12	17,7	45,5
Irdyk	4,0	41,9	14,1	5,80	13,8	41,1
Karakol	58,3	213,8	87,8	43,14	20,2	49,1
Aksu	68,0	307,5	63,2	54,99	17,9	87,0
Džerges, Bozucak	1,3	71,6	10,9	1,10	1,5	10,1
Turgen'-Aksu	33,2	204,7	81,4	23,66	11,6	29,1
Džergalan	2,5	147,9	45,3	2,52	1,7	5,6
Tjup	4,2	266,5	64,8	4,90	1,8	7,6
Südabdachung des Kungej Alatau						
Kammenaja	3,2	48,6	18,8	2,54	5,2	13,5
Bajsaur	4,4	43,8	14,0	3,88	8,9	27,7
Aksu	12,1	92,7	34,7	9,03	9,7	26,0
Con-Aksu	65,2	160,0	60,0	58,73	36,7	-
Dolonaty	4,0	38,5	3,3	3,81	9,9	-
Colpon-Ata	10,3	40,4	13,3	8,61	21,3	64,7
Con-Kojsu	6,1	39,1	13,6	6,14	15,7	45,1
Orto-Kojsu	9,3	24,6	12,8	6,57	26,7	51,3
Cet-Kojsu	4,0	10,1	3,1	2,92	28,9	-
Cotkal	15,4	16,7	6,2	8,84	52,9	-
Kabyrga	5,7	4,4	2,44	3,50	79,3	-

Auffallend in Tabelle 27 sind die stark variierenden Anteile der Gletscherschmelze am Sommerabfluss. Eine besonders hohe quantitative Bedeutung des Schmelzwassers ist für die Flüsse Akterek, Ton, Ak-Saj, Cet-Kojsu, Cotkal und Kabyrga im westlichen Teil des Beckens charakteristisch. Vermutlich liegt die Ursache in geologisch-hydrologischen Besonderheiten dieser Beckenlage. Insbesondere Vertiefungen in den Flusstälern (Konurulen, Alabaš) mit bis zu 200 m mächtigen alluvialen Ablagerungen oder weit ausgedehnte Schotterfluren (Dolonaty) führen zur Infiltrierung des Oberflächenwassers in diese Grundwasserleiter und zu einer zeitlichen Verzögerung des Abflusses. An allen Pegeln, die sich oberhalb dieser hydrologischen Puffer befinden, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen Vergletscherungsgrad (Kol) und dem Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss (RI). Der Korrelationskoeffizient für das Höhenintervall zwischen 2500 m ü. M. und 3300 m ü. M. beträgt $0,76 \pm 0,06$. Die Regressionsgleichung stellt sich wie folgt dar:

$$RI = 1,18Kol - 0,6$$

Am besten sind die Resultate in den Einzugsgebieten, die einen Vergletscherungsgrad von über 5% aufweisen. Im Issyk-Kul'-Becken sind dies praktisch alle Flüsse, deren Oberläufe bis zum Hauptkamm der Gebirgsketten reichen.

3.3. Abflussregime in Jahren mit extremen meteorologischen Bedingungen

In Abhängigkeit vom Vergletscherungsgrad des Beckens ändert sich die Bedeutung von Niederschlag und Temperatur für die Abflussbildung. Bei starken Abweichungen von durchschnittlichen Lufttemperaturen und Niederschlägen reagieren nicht alle Flüsse mit einer deutlichen Änderung des Abflusses, aber in praktisch allen Fällen wird die Erhöhung der Temperatur um $0,7-0,9^{\circ}\text{C}$ von einer Absenkung des Niederschlags begleitet.

Betrachtet wird das Abflussregime von Flüssen, deren Einzugsgebiete nicht schwach oder stark vergletschert sind. In diesen Flüssen wurden langjährige Monatsmittel des Abflusses mit Monatsmitteln aus Jahren mit extremen Temperatur- und Niederschlagswerten verglichen. Die meteorologischen Mittelwerte dieser Extremjahre sind in Tabelle 28 aufgeführt.

Tab. 28: Jahresmitteltemperatur T (°C) und Niederschlagssumme N (mm) der Station Pokrovka (Kyzyl-Suu).

Merkmal	Jahr	T (°C)	N (mm)
Langjähriges Mittel		16,0	435
Maximale Temperatur	1997	17,8	251
Minimale Temperatur	1972	15,0	372
Maximaler NS, mm	1886	15,5	619
Minimaler NS, mm	1996	16,2	248

Für jeden Extremwert in Tabelle 28 wird auch der Wert der anderen meteorologischen Größe für das jeweilige Jahr angegeben. Die Abflussganglinien werden in den Abbildungen 6-11 einander gegenübergestellt.

Der Ojtal und Toruajgyr liegen im östlichen bzw. westlichen Teil des Kungej Alatau und besitzen keine Gletscher im Einzugsgebiet. Die ergiebigen Niederschläge im Gebiet des Ojtal äußern sich in der hohen Abflussspende von 14 l/s*km^2 . Bei wesentlich geringeren Niederschlagsmengen im Gebiet des Toruajgyr beträgt der Wert hier nur noch $5,3 \text{ l/s*km}^2$. In beiden Flüssen (Abb. 6,7), vor allem aber beim Toruajgyr, wird die Temperaturerhöhung von einer deutlichen Verringerung der Wasserführung begleitet. Jahresabflüsse von nivo-pluvialen Flussregimen zeigen eine enge Korrelation mit dem Jahresniederschlag.

In den Abbildungen 8 und 9 sind die Hydrographen der Gebiete mit geringer Vergletscherung dargestellt. Tjup und Turasu entspringen den östlichsten bzw. westlichsten Teilen des Terskej Alatau. Die vergletscherte Fläche im Einzugsgebiet des Tjup umfasst $5,4 \text{ km}^2$, die des Turasu $2,4 \text{ km}^2$. Die Abflussspende beträgt $9,7 \text{ l/s*km}^2$ bzw. $5,35 \text{ l/s*km}^2$. Diese Unterschiede werden durch Niederschläge verursacht. Die dominierende Rolle des Niederschlags zeigt sich auch an den Korrelationskoeffizienten (Tab. 4): zwischen Abfluss und Niederschlag sind sie positiv, während der Zusammenhang mit den Temperaturen negativ ist. Die Abflussganglinien des Tjup zeigen für das Normaljahr meist höhere Abflussmengen als in den Extremjahren. Dieses Phänomen kann man dadurch erklären, dass sich der Abfluss aus Niederschlag und Schmelze zusammensetzt, was in durchschnittlichen Jahren eine höhere Wasserspende zur Folge haben kann als in Jahren, in denen nur eine der beiden Komponenten (wenn auch in extremem Maß) abflusswirksam wird.

In den Gebieten mit gut entwickelter Vergletscherung spiegelt der Abfluss die Abhängigkeit der Gletscherschmelze von der Lufttemperatur wieder (Abb. 10,11). Im Con-Kyzyl-Suu ist der Abfluss im Juli und August bei minimalen Niederschlägen größer als

bei maximalen. Aufgrund des gegenläufigen Verhaltens von Niederschlag und Temperatur ist diese Kompensationswirkung der Gletscher auf den Abfluss gesetzmäßig. Darin zeigt sich auch die grundlegende Bedeutung der Vergletscherung für die Gewährleistung einer stabilen Wasserversorgung bei einer Klimaerwärmung.

Abb. 6: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Ojtal)

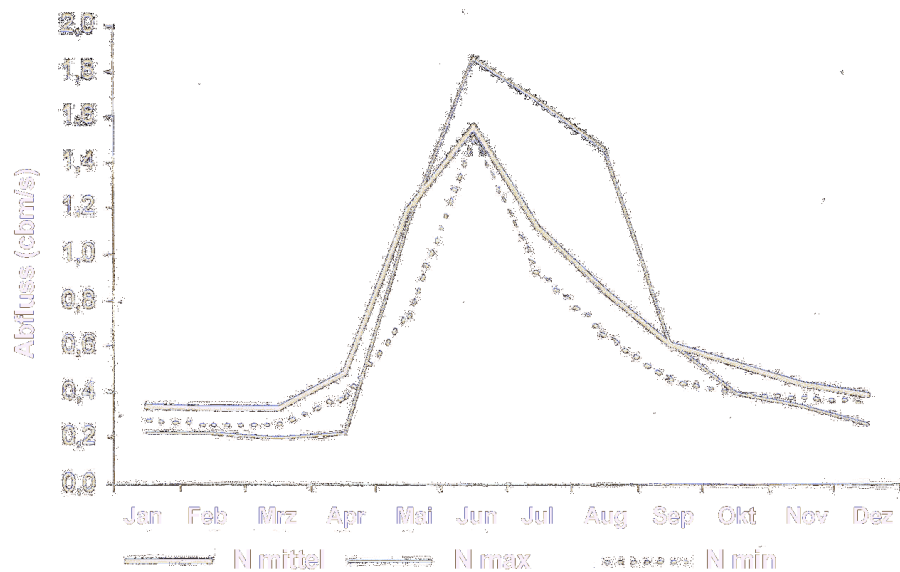
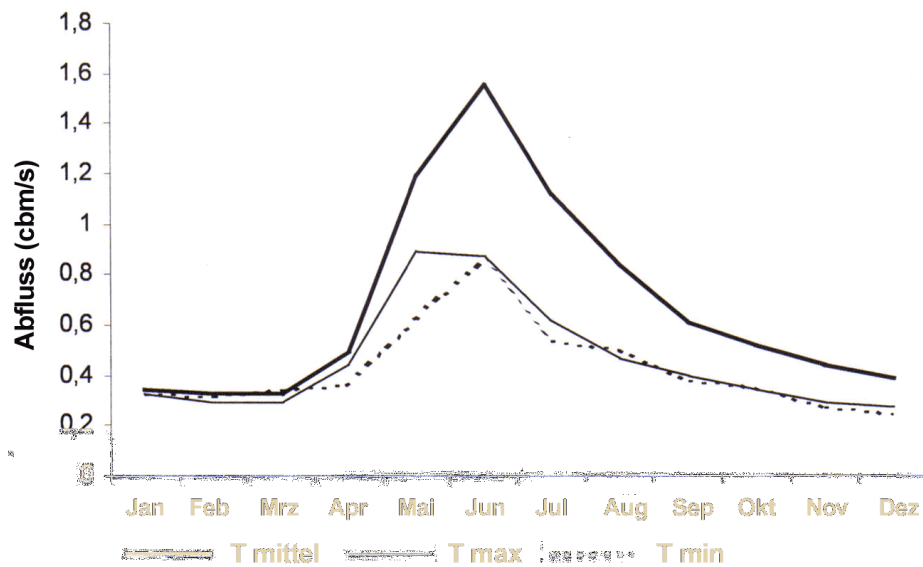


Abb. 7: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Toruajgyr, Kyzyl-Bulak Mündung)

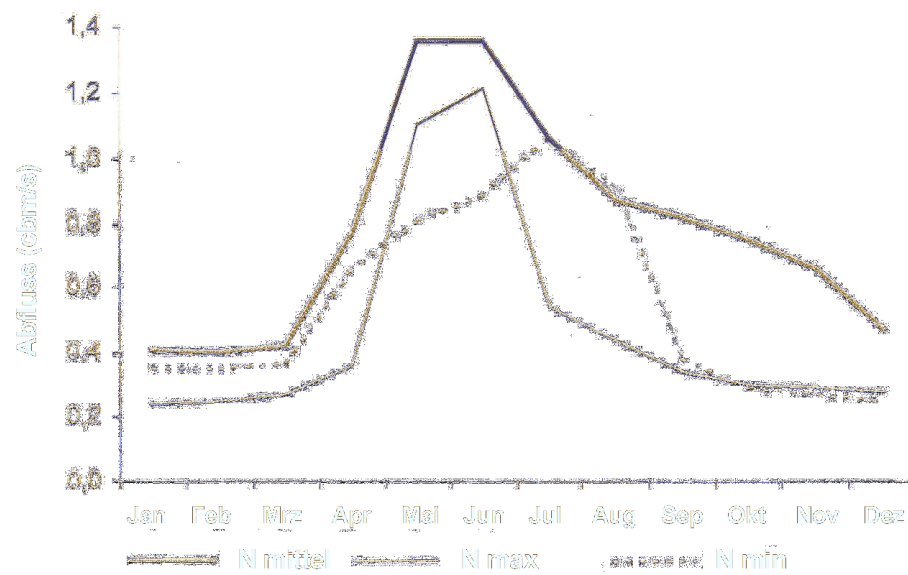
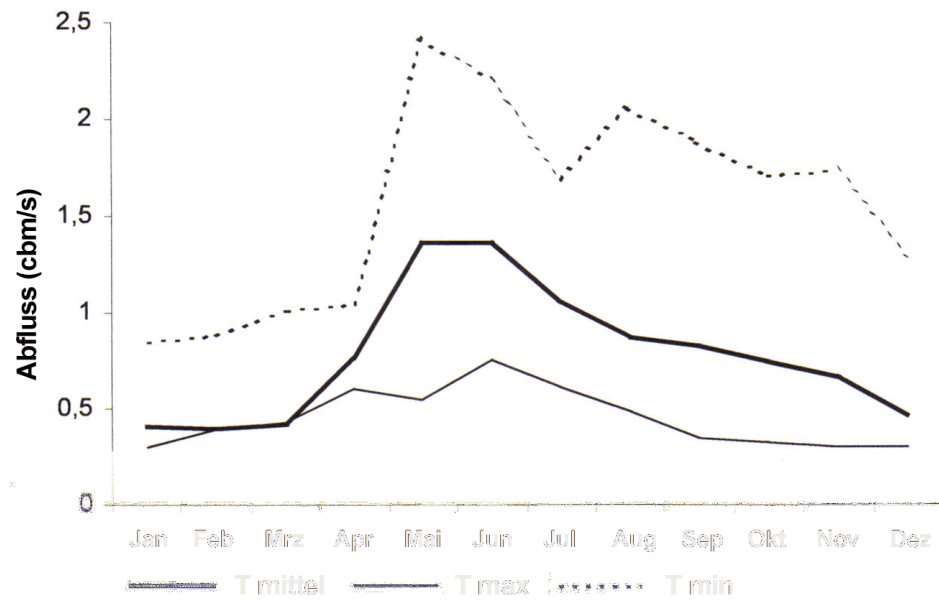


Abb. 8: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Tjup)

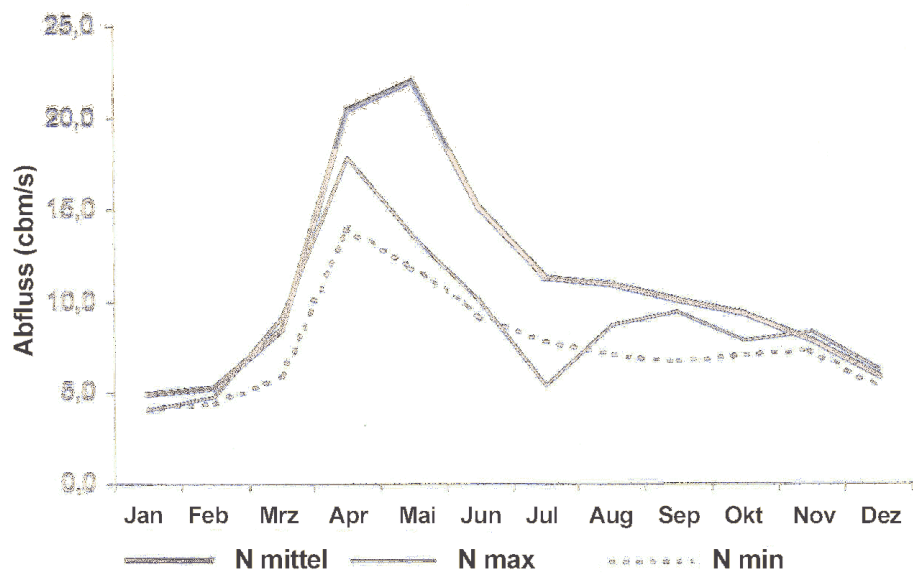
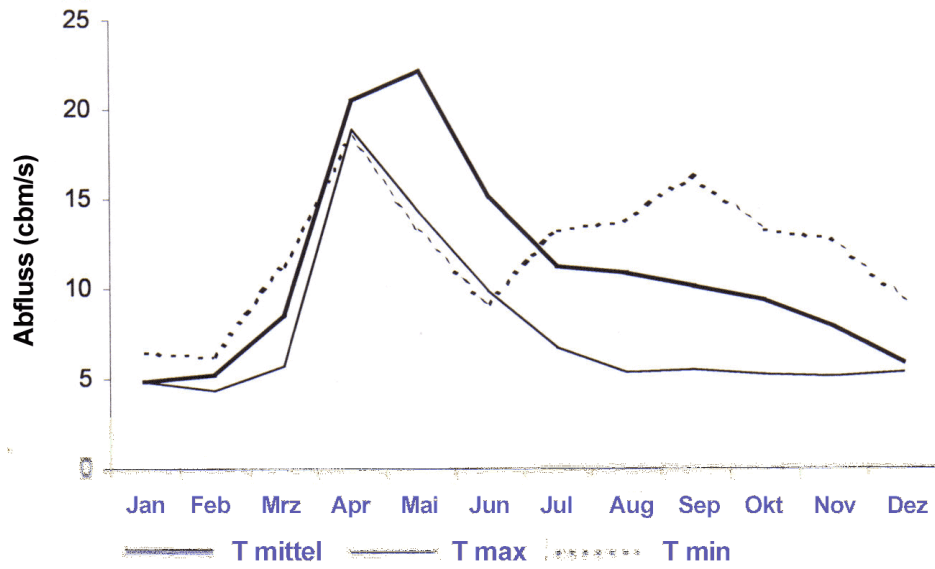


Abb. 9: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Station Turasu)

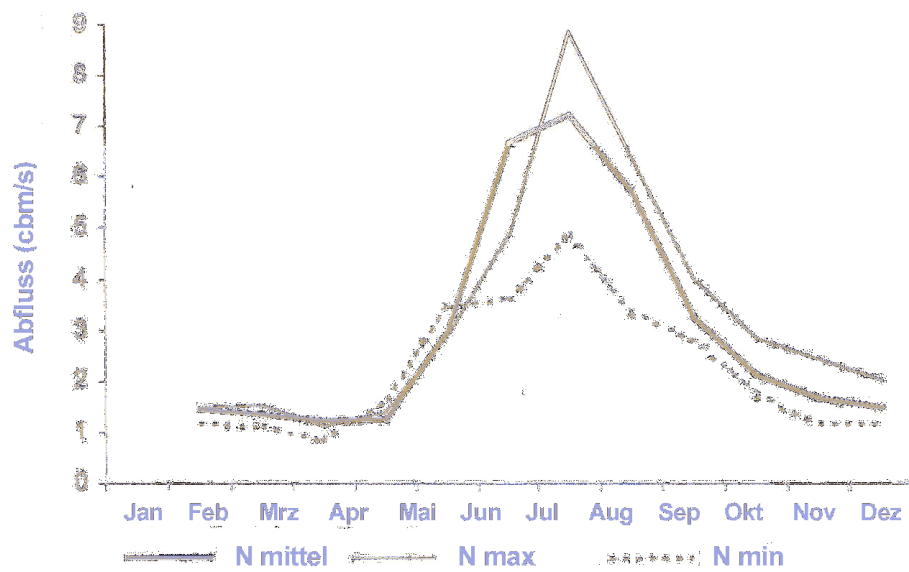
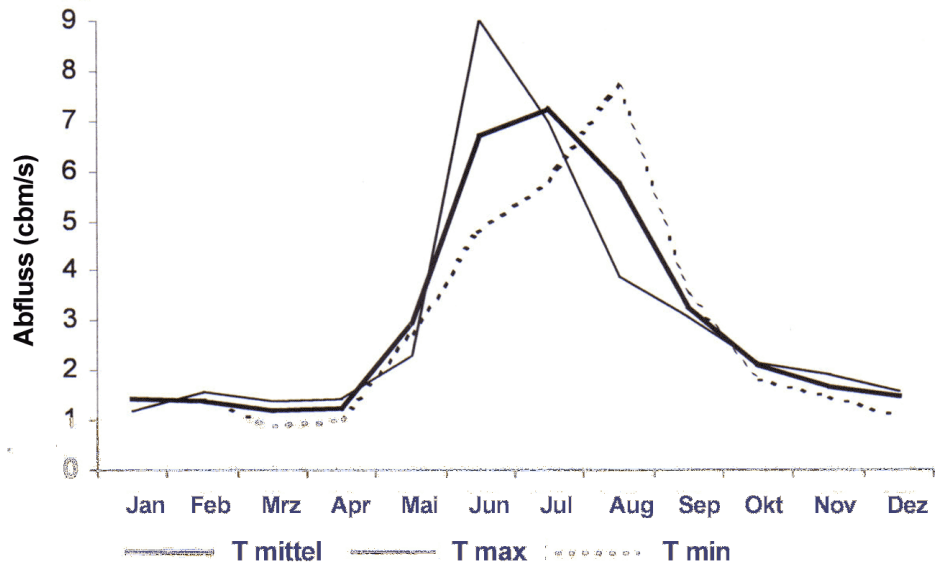


Abb. 10: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Con-Aksu – Station Grigor’evka)

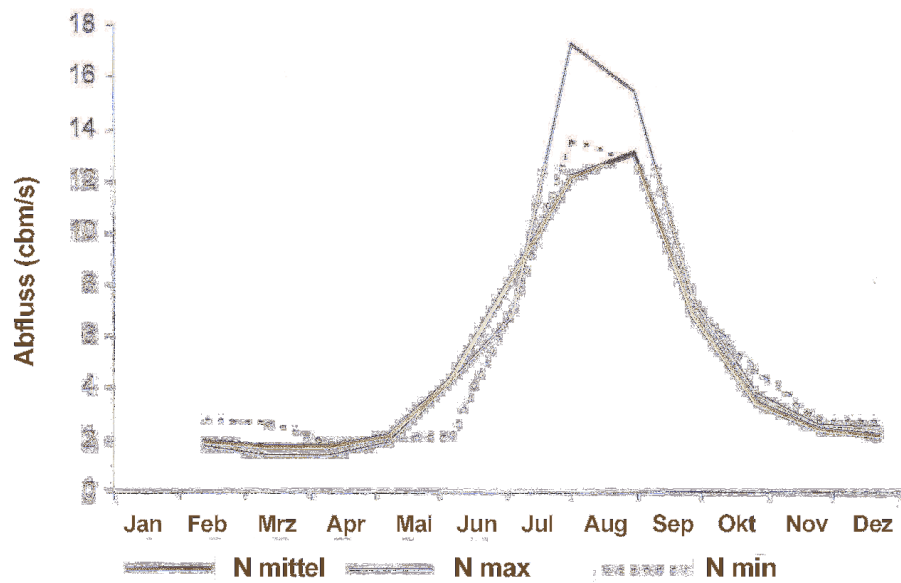
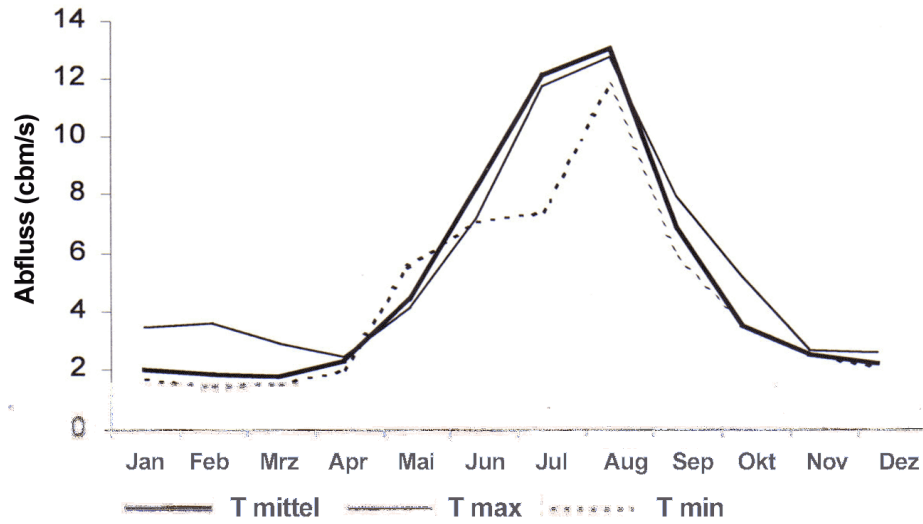
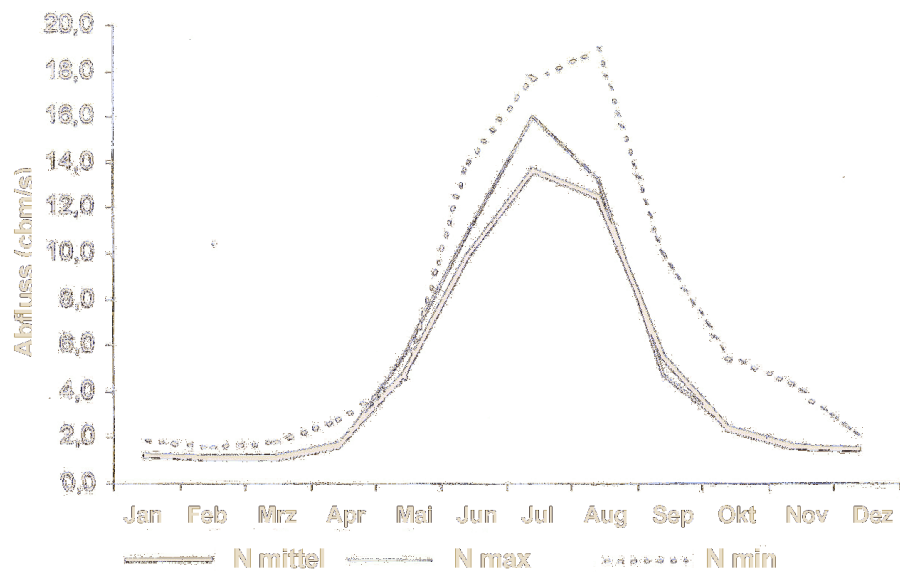
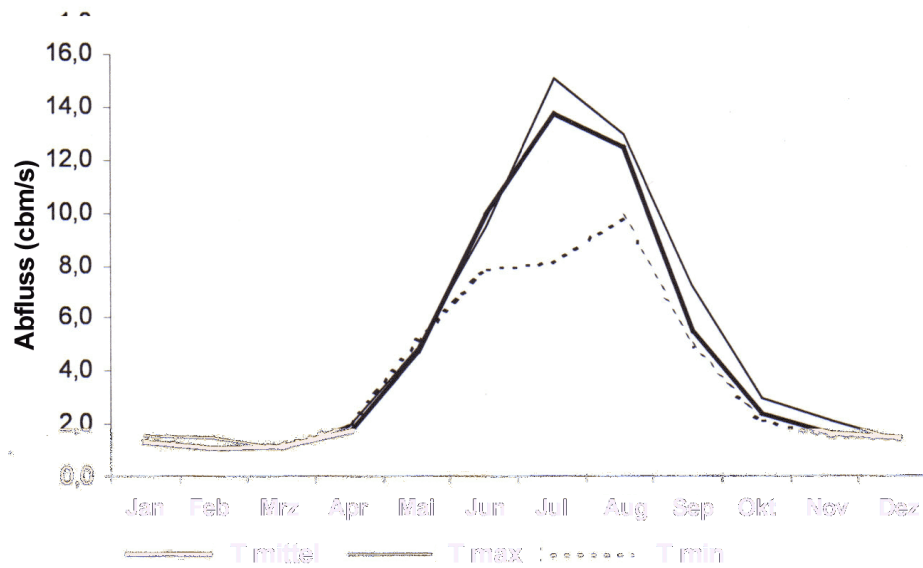


Abb. 11: Jahresgang des Abflusses in Jahren mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen (Con-Kyzyl-Suu – Waldposten)



4. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Gletscherabfluss

Wassermangel stellt im Issyk-Kul'-Becken derzeit kein ökonomisches Entwicklungshemmnis dar. Dies belegen Zahlen über den Wasserverbrauch für unterschiedliche Zwecke im Zeitraum von 1991 bis 2000. Die Bewässerung ging bis zum Jahr 2000 um 63% zurück, für industrielle Belange wurde 60% weniger Wasser entnommen (Alamanov et al. 2000). Der enorme Rückgang des Wasserverbrauchs in allen Wirtschaftszweigen führte zu einem sukzessiven Anstieg des Seespiegels um insgesamt 30 cm. Die Aufrechterhaltung dieser günstigen Wasserversorgung hängt von der Entwicklung natürlicher und anthropogener Prozesse ab. Während die Menge der Zuflüsse vor allem von den meteorologischen Faktoren Lufttemperatur und Niederschlag gesteuert wird, schwankt die Höhe der Wasserentnahme mit der Art und Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung.

Im vorangegangenen Kapitel wurde das Abflussregime der Flüsse mit unterschiedlichen Quellen der Speisung betrachtet. Außerdem wurde die quantitative Abhängigkeit des Abflusses von klimatischen Faktoren dargestellt. Im nachfolgenden Abschnitt werden nun die Änderungen von Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss in einem zeitlichen Maßstab betrachtet.

4.1 Abflussveränderungen in Einzugsgebieten mit unterschiedlichem Vergletscherungsgrad

Nach Untersuchungen von Budyko (1985) ist ein anthropogener Einfluss auf das Klima seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts feststellbar. Dadurch ist es zulässig, Abflussschwankungen über einen größeren Zeitraum als 25 Jahre als natürlich verursacht zu betrachten (Bol'sakov 1974).

Dieser Klimatrend drückt sich auch in der Entwicklung der Massenbilanzen der Gletscher (Podrezov et al. 2001) aus. Im Kungej Alatau sind diese seit 1973 durchgehend negativ. In den letzten 30 Jahren kam es zum Rückgang der Vergletscherung in Verbindung mit einem erhöhten Schmelzwasseranfall und einem Anstieg der Abflussmengen. Abhängig vom Grad der Vergletscherung und der Niederschlagsmenge in der Hochgebirgszone kam es zu unterschiedlich starken Veränderungen des Abflusses. In Tabelle 29 sind der mittlere Abfluss in unterschiedlichen Jahreszeiten und der mittlere Jahresabfluss für zwei unterschiedliche Zeiträume und für typische Flüsse des Issyk-Kul'-Beckens aufgeführt.

Tab. 29: Mittlerer Abfluss zu verschiedenen Jahreszeiten und Zeiträumen für typische Flüsse des Issyk-Kul'-Beckens (m³/s)

Fluss (Messstelle)	Periode	Monat				Sommer		Jahr	
		Jan.	Apr.	Jul.	Okt.				
Tjup (Sarytologoj)	1930-1962	2,59	14,5	11,5	4,44	11,9	-5,9%	8,27	-6,5%
	1976-1993	2,50	17,5	11,4	4,60	11,2		7,73	
Džergalan (So- wetstkoe)	1926-1962	1,43	5,42	8,07	2,44	8,22	4,3%	4,53	7,0%
	1976-2000	1,46	6,32	8,99	2,83	8,57		4,56	
Karakol (Kaš- kasmündung)	1929-2000	1,94	2,26	18,2	3,84	16,0	4,4%	6,54	3,2%
	1976-2000	1,77	2,37	19,3	3,97	16,7		6,75	
Con-Kyzyl-Suu (Waldkordon)	1930-1962	1,29	1,62	13,4	2,40	11,8	17,8%	4,7	18,5%
	1976-2000	1,43	2,00	16,0	3,06	13,9		5,57	
Ton (Turasu)	1925-1962	0,85	0,90	4,77	1,67	4,52	29,2%	2,15	31,2%
	1976-2000	1,36	1,38	6,34	2,22	5,84		2,82	
Toryajgyr-Kyzyl (Bulakmündung)	1937-1962	0,26	0,30	0,60	0,40	0,63	33,3%	0,43	34,9%
	1976-2000	0,32	0,52	0,88	0,48	0,84		0,58	
Colpon-Ata (Colpon Ata)	1932-1962	0,49	0,69	2,58	0,90	2,41	19,9%	1,23	17,1%
	1976-2000	0,58	1,05	3,34	1,06	2,89		1,44	
Ojtal (Ojtal)	1932-1960	0,18	0,26	0,91	0,33	0,96	21,9%	0,50	36,0%
	1976-2000	0,34	0,49	1,02	0,52	1,17		0,68	
Con- Aksu (Gri- gor'evka)	1930-1962	2,01	2,24	11,9	3,65	10,9	9,2%	5,06	6,1%
	1976-2000	2,21	2,33	13,8	3,91	11,9		5,37	

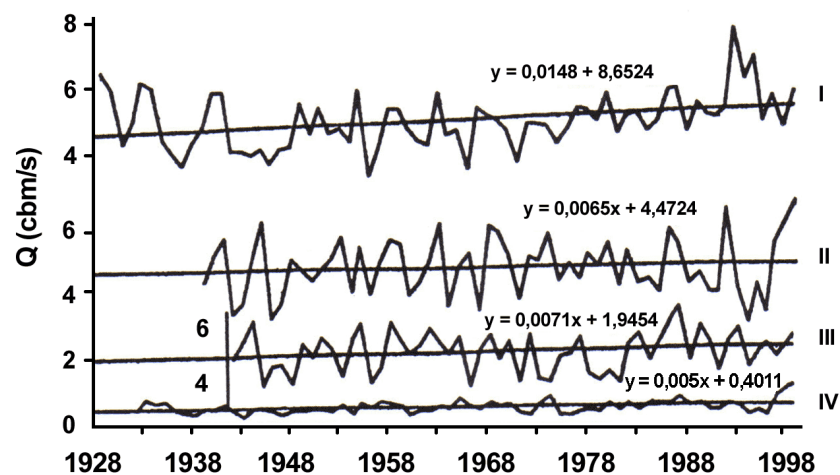
Die Werte in Tabelle 29 zeigen keine einheitliche Änderung des Abflusses. Abnahmen des Jahresabflusses zwischen 6,2 und 6,6% zeigen nur die beiden Flüsse Tjup und Džergalan, in allen anderen Gebieten nahm er zwischen 3,2% (Karakol) und 36,0% (Ojtal) zu. Trotz des großen prozentualen Unterschiedes ändert sich die absolute Abflussmenge beim Ojtal nur geringfügig (0,18 m³/s), auch bei allen anderen liegt die Differenz unter 1 m³/s.

Für den Bewässerungsfeldbau sind Änderungen der sommerlichen Wasserführung am bedeutsamsten. An den untersuchten Flüssen liegen die sommerlichen Abflussänderungen in der gleichen Größenordnung wie die jährlichen. Am Tjup verringert sich der Abfluss im Zeitraum Juni-August um 5,9%, am Džergalan und am Toruajgyr erhöht er sich um 4,3% bzw. 33,3%. Die größten absoluten Anstiege der Abflussmengen sind mit 1,0 m³/s und 2,1 m³/s am Con-Aksu und am Con-Kyzyl-Suu zu verzeichnen. Im Hinblick auf die Klimaerwärmung sind diese Veränderungen von großer Bedeutung, sie verdienen besondere Aufmerksamkeit.

In Abbildung 12 ist die zeitliche Entwicklung der Jahresabflüsse in Einzugsgebieten mit fehlender (Ojtal), unbedeutender (Džergalan) und ausgeprägter Vergletscherung (Con-Kyzyl-Suu 43,3 km² und Con-Aksu 65,2 km²) (Podrezov et al. 2001) dargestellt. Es ist überall ein Anstieg des Abflusses zu beobachten, die Stärke des Trends ist allerdings uneinheitlich. Etwas aus dem allgemeinen Schema heraus fällt im Hinblick auf den hohen Vergletscherungsgrad der Abfluss des Con-Aksu. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der größeren Höhenlage der Vergletscherung, die ein langsames Reagieren auf die Erwärmung hervorruft.

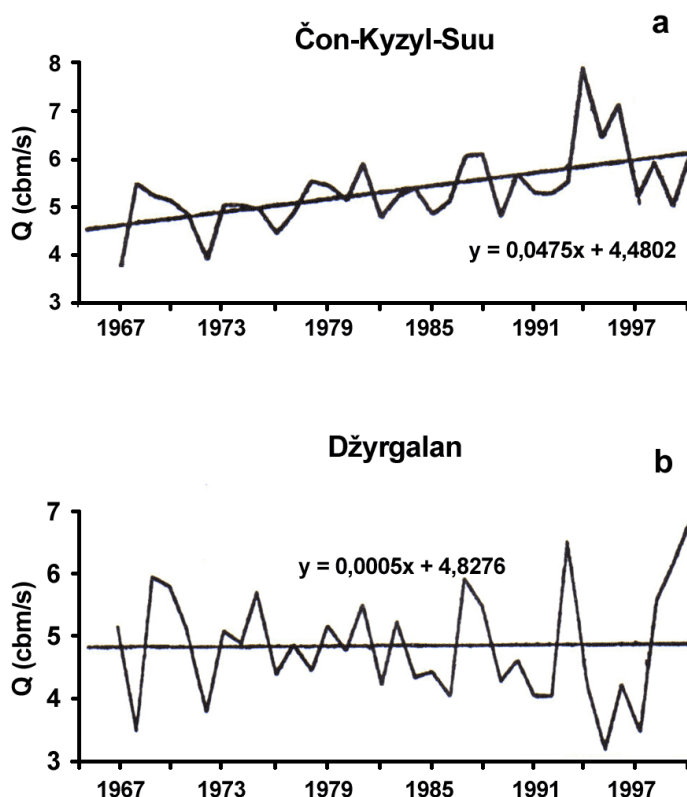
Abb. 12: Entwicklung des mittleren Jahresabflusses von I – Con-Kyzyl-Suu; II – Džergalan; III – Con-Aksu; IV – Ojtal.

6



Die Flüsse mit sommerlichem Abflussmaximum (Abb. 13) erfuhren seit der zweiten Hälfte der 1960er Jahre, als sich der anthropogene Einfluss auf das Klima bemerkbar machte, eine besonders große Zunahme der Abflussmenge.

Abb. 13: Entwicklung des mittleren Jahresabflusses von Flüssen mit unterschiedlichem Abflussregime. a) Glazio-nivales Regime; b) Nivales Regime.



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in allen Flüssen des Beckens in den letzten Jahrzehnten eine Veränderung des Abflusses stattfand, wenn auch mit unterschiedlicher Intensität und Richtung. Für eine genauere Ursachenanalyse müssen Veränderungen der wichtigsten abflussbildenden Faktoren, nämlich der Lufttemperatur, des Niederschlags und der Vergletscherung, untersucht werden.

4.2 Temperaturschwankungen

Die Lufttemperatur ist einer der bestimmenden Faktoren für die Abflussbildung im Tjan'-Šan'. In der Hochgebirgszone des Issyk-Kul'-Beckens werden 80-87% des jährlichen Abflusses gebildet. Eine Temperaturerhöhung führt in vergletscherten Teileinzugsgebieten aufgrund der intensiveren Schmelze zu einem Anstieg des Abflusses, während in unvergletscherten Gebirgstteilen höhere Verdunstungsraten zu einer Verkleinerung der Abflussspende sorgen. Im Hochgebirge wird eine Erwärmung um $0,7^\circ$ bis $1,0^\circ\text{C}$ von einer Erhöhung der Verdunstungsintensität um 14-20% und einer Verkleinerung der Gletscherfläche um 30-35% begleitet.

Das Untersuchungsgebiet ist wegen seiner Abgeschlossenheit durch einen einheitlichen Temperaturgang gekennzeichnet, obwohl Unterschiede in der Meereshöhe und der Schneebedeckung zu kleinräumigen Temperaturunterschieden führen können. Sie machen sich besonders in der Vorgebirgszone bemerkbar, nehmen mit zunehmender Höhe aber ab, was durch unterschiedlich starke Korrelationen zwischen den verschiedenen Messstationen deutlich wird.

Zwischen den meteorologischen Stationen in der Vorgebirgszone (Rybace, 1660 m ü. M.) und denen des mittleren Höhengürtels (Bol'saja Kyzyl-Suu, 2550 m ü. M.) variiert der Korrelationskoeffizient der Lufttemperatur im Laufe des Jahres zwischen 0,66 und 0,82, der Mittelwert liegt bei 0,74. Im Hochgebirge ist der Gang der Temperatur weniger veränderlich – der Korrelationskoeffizient zwischen den Stationen dieses Höhenbereichs beträgt 0,84. Dies erlaubt es, die lange meteorologische Beobachtungsreihe der Stationen Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.) als charakteristisch für die Höhenzone der maximalen Abflussbildung zu betrachten. In Tabelle 30 werden die Jahres- und Sommermittel der Lufttemperatur dieser Station und deren Trend für verschiedene Zeiträume den entsprechenden Werten der Vorgebirgsstation Pokrovka (1740 m ü. M.) gegenübergestellt.

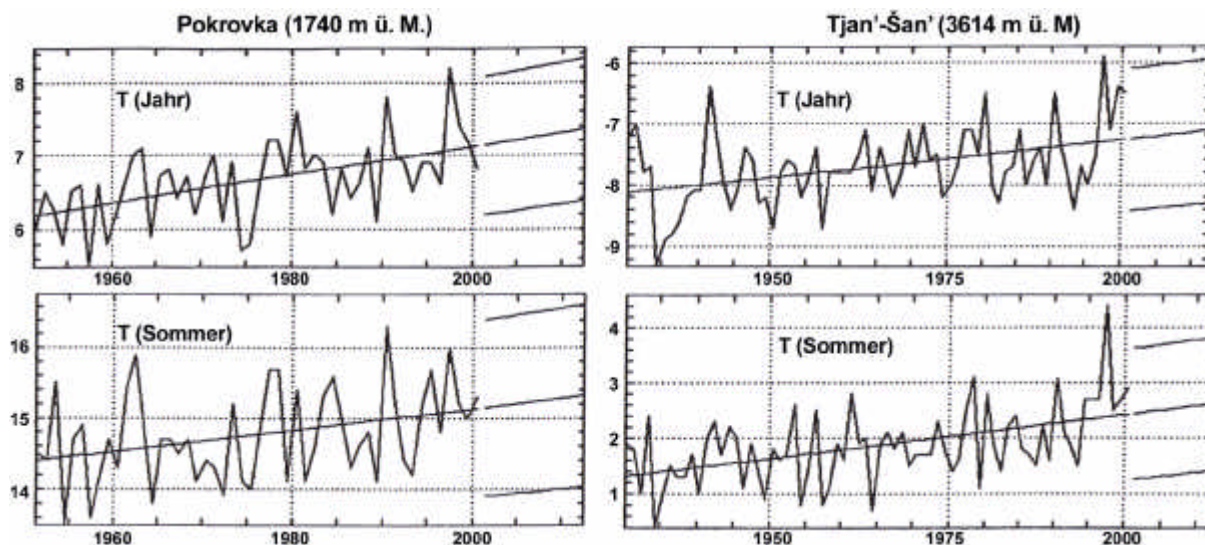
Tab. 30: Mittelwerte und Trends der Jahres- und Sommertemperaturen für unterschiedliche Höhenzonen und Zeiträume.

Zeitraum	Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.)				Pokrovka (1740 m ü. M.)			
	Jahr		Sommer		Jahr		Sommer	
	Mittel (°C)	Trend (°C)	Mittel (°C)	Trend (°C)	Mittel (°C)	Trend (°C)	Mittel (°C)	Trend (°C)
1930-2000	-7,70	0,012	1,90	0,014	-	-	-	-
1941-2000	-7,61	0,011	1,96	0,016	-	-	-	-
1951-2000	-7,57	0,014	2,01	0,022	6,67	0,019	14,77	0,006
1961-2000	-7,50	0,014	2,11	0,024	6,77	0,015	14,85	0,009
1971-2000	-7,44	0,020	2,19	0,037	6,83	0,022	14,90	0,013
1981-2000	-7,46	0,063	2,29	0,073	6,90	0,030	14,98	0,023
1991-2000	-7,27	0,184	2,61	0,139	7,04	0,051	15,10	0,058

Sowohl in der Vorgebirgs- als auch in der Hochgebirgszone ist die Richtung des Trends einheitlich, die Intensität jedoch nicht. In großen Höhen ist die Erwärmung stär-

ker als in tieferen Lagen, eine besonders starke Temperaturerhöhung fand zwischen 1981 und 2000 statt. In diesen Jahren stieg der Abfluss überall, vor allem in den Sommermonaten. Trotz der Stabilität dieses Trends gibt es Schwankungen, die bei den Jahresmitteln ähnlich hoch sind wie bei den Sommertemperaturen (Abb. 14).

Abb. 14: Entwicklung der Jahres- und Sommermitteltemperaturen der Stationen Pokrovka und Tjan'-Šan'.



Laut der Studie „First National Communication of the Kyrgyz Republic under the UN Framework Convention on Climate Change“ (UNDP 2003) wird der Trend der Temperaturerhöhung auch im 21. Jahrhundert bestehen bleiben. Diese Erkenntnis beruht auf den Ergebnissen der globalen Zirkulationsmodellen HadCM-2, UKTR und CSIRO2-EQ, mit denen Klimaszenarien für die Jahre 2050 und 2100 erstellt wurden. Diesen liegen zwei Emissionsszenarien, nämlich Verdopplung des CO₂-Gehalts bzw. Erhöhung um 35%, zugrunde. Bis zum Jahr 2050 prognostizieren die Klimamodelle eine Erhöhung der Jahrestemperatur um 1,3°-2,2°C (Mittelwert: 1,6°C) und der Sommertemperatur um 0,6°-1,9°C (Mittelwert: 1,4°C). Eine solcher Temperaturanstieg würde die Gletscherschmelze um 40% ansteigen lassen.

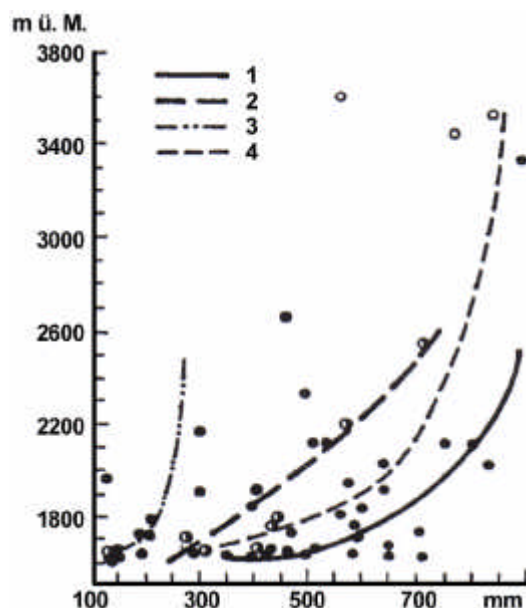
4.3 Änderung des Niederschlags

Im Unterschied zur Lufttemperatur sind die Niederschläge durch eine stärkere räumliche Variabilität gekennzeichnet, was in den Abflussmengen und im Vergletscherungsgrad der Teileinzugsgebiete zum Ausdruck kommt. Dies wird in der unterschiedlich guten Korrelation zwischen den Jahreswerten von Abfluss und Niederschlag sehr deut-

lich. Der Korrelationskoeffizient variiert zwischen 0,49 (Tjup) und $-0,01$ (Colpon-Ata). Die unterschiedliche Verteilung des Niederschlags zeigt sich sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung (Abb. 15).

Abb. 15: Änderung des Niederschlags mit der Höhe (Ponomarenko 1976).

1 – nördliches Vorland; 2 - südliches Vorland; 3 - westliches Vorland;
4 – östliches Vorland



Horizontale Niederschlagsgradienten sind für alle Höhenzonen mit Ausnahme der Hochgebirgszone (> 3000 m ü. M.) charakteristisch. Im nivalen Gürtel ist der Jahresniederschlag am höchsten, wobei die Werte für die Nordabdachung des Terskej Alatau diejenigen der Südabdachung des Kungej Alatau um 44-50% übersteigen. Dieser enorme Unterschied zeigt sich natürlich in den Abflussmengen und dem Vergletschungsgrad.

Eine Besonderheit der Niederschlagskurven in der Hochgebirgszone des Tjan'-Šan' ist ihre Gegenläufigkeit zum Gang der Lufttemperatur. Besonders deutlich wird das in den Jahren, in denen die Temperatur das langjährige Mittel um $0,7^{\circ}$ - $1,0^{\circ}\text{C}$ übersteigt.

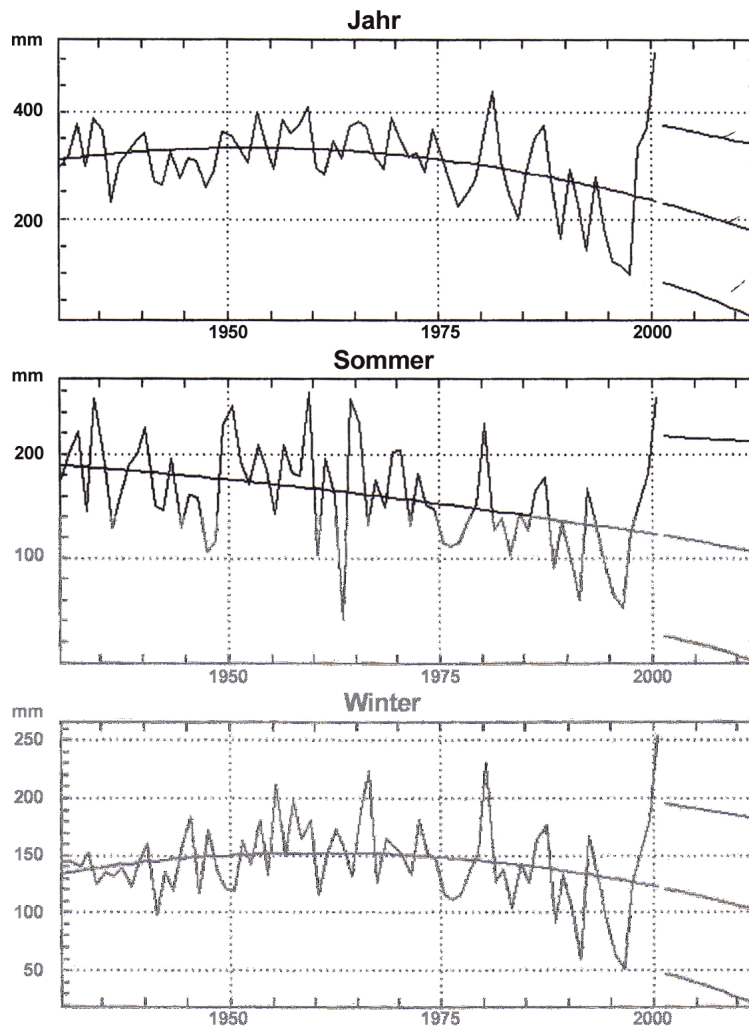
Während die Lufttemperatur in der Hochgebirgszone seit 1930 beständig ansteigt (Tab. 30), sind die Niederschlagsänderungen in unterschiedlichen Zeitabschnitten uneinheitlich (Tab. 31).

Tab. 31: Mittelwerte und Trends der Jahres- und Sommerniederschläge (mm) der meteorologischen Station Tjan'-Šan' (3614 m ü. M.) für unterschiedliche Zeiträume.

Zeitraum	Jahr		Sommer	
	Summe	Trend	Summe	Trend
1930-2000	307,8	-1,095	144,1	-0,178
1941-2000	304,0	-1,381	154,4	-0,915
1951-2000	304,3	-2,488	152,6	-1,355
1961-2000	292,9	-2,753	144,9	-1,182
1971-2000	276,4	-2,267	135,2	-0,359
1981-2000	265,6	-2,255	129,1	1,179
1991-2000	238,1	25,385	127,8	12,438

Trotz des allgemeinen negativen Trends haben die Niederschläge während der längeren Zeit von 1949-1975 das langjährige Mittel um 11,4 % überstiegen. In diesem Zeitraum lagen die Jahresniederschläge 21 mal über dem Mittelwert (Maximum: 33,5%), aber nur sechs mal darunter (Minimum: -8,3%). Der positive Trend der darauffolgenden 10 Jahre ist durch die hohen Niederschläge in den Jahren 1998-2000 bedingt. In den Jahren 2001 und 2002 lagen die Jahressummen dann wieder 18% bzw. 22,4% unter dem Normalwert und haben die niederschlagsreiche Periode beendet. Für den ganzen Beobachtungszeitraum von 1930 bis 2000 beträgt der längste Zeitabschnitt ununterbrochen überdurchschnittlicher Niederschläge sechs Jahre. Insgesamt ist die Variabilität der Jahresniederschläge sehr hoch, wobei die Schwankungen in den einzelnen Jahreszeiten nicht immer synchron verlaufen.

Abb. 16: Entwicklung der Niederschlagsmengen an der Station Tjan'-Šan' (1930 – 2000).



Auf längere Sicht bilden die Niederschläge der Sommermonate den Großteil der Jahressumme (52%). In einzelnen Jahren können jedoch auch das Frühjahr oder der Herbst die niederschlagsreichste Jahreszeit darstellen. Solche Situationen entstehen zwar selten, aber sie erschweren die Abschätzung des Sommeranteils am Jahresniederschlag.

Die sich abzeichnende Klimaerwärmung gefährdet die Gesetzmäßigkeit der Niederschlagszunahme mit der Höhe. In Tabelle 32 sind Niederschlagstrends für unterschiedliche Höhenzonen dargestellt.

Tab. 32: Änderung des Jahresniederschlags in verschiedenen Höhenzonen

Zeitraum	Kyzyl-Suu 1740 m ü.u M.	Santaš 2320 m ü. M.	Con-Ašu 2800 m ü. M.	Tjan'-Šan' 3614 m ü. M.
1951-2000	0,660	-	-	-2,488
1963-2000	-	3,18	-1,837	-2,753
1968-2000	-	-	-	-0,359

Der uneinheitliche Niederschlagstrend in den verschiedenen Höhenzonen erschwert die Erstellung einer Prognose. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurden Niederschlagsszenarien (UNDP 2003) mit verschiedenen Modellen sowohl für das gesamte Staatsgebiet Kirgistans als auch für einzelne Teilregionen berechnet. Dabei wurden zwei Zustände der Atmosphäre, eine erhöhte und eine niedrige Aerosolkonzentration berücksichtigt. Im ersten Fall steigt der Jahresniederschlag bis zum Jahr 2050 um 16-37%, im zweiten Fall nur um 3-18%. Blicke der Aerosolgehalt in der Atmosphäre auf dem Niveau der letzten 25 Jahre des 20. Jahrhunderts, so stiege die Niederschlagsmenge um 8% an (UNDP 2003).

Die regionalisierten Ergebnisse des Modellkomplexes GRADS unterscheiden sich wesentlich von den vorherigen. Diesen Berechnungen wurde der CO₂-Gehalt der Atmosphäre zugrunde gelegt, im vorliegenden Fall wurde er verdoppelt. Tabelle 33 zeigt die so erhaltenen Niederschlagsänderungen in Relation zum Referenzzeitraum (1961-1991).

Tab. 33: Szenarien der Niederschlagsänderung nach einer Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre.

	Modell	Jahreszeit				Jahr
		Winter	Frühling	Sommer	Herbst	
Issyk-Kul'-Becken	GFD 3	1,28	1,18	1,71	1,32	1,37
	SSSM	1,09	1,18	0,62	0,70	0,90
Kirgistan	SSSM	1,06	1,07	0,62	0,82	0,89

Da die Resultate nicht eindeutig sind und kein Modell bevorzugt werden kann, wurde für weitere Berechnungen eine mittlere Niederschlagserhöhung von 10% angenommen. Die Änderung der Lufttemperatur wurde auf 1,4°C geschätzt, womit die beiden

wichtigsten Größen für die Berechnung des Gletscherabflusses unter verändertem Klima festgelegt sind.

4.4 Der Gletscherabfluss bis Mitte des 21. Jahrhunderts

Die Flächen- und Expositionsverteilung mit der Höhe bestimmt in den Gebirgsketten im Issyk-Kul'-Becken die räumliche Verteilung der Lufttemperatur und des Niederschlags und hat damit einen entscheidenden Einfluss auf die Vergletscherung und Abflussbildung. Zusammen mit den Veränderungen des Klimas wird der Einfluss dieser topographischen Faktoren bei der Erstellung von Abflussprognosen berücksichtigt. Die Berechnungen wurden für stark, mittel und schwach vergletscherte Einzugsgebiete im Terskej Alatau und im Kungej Alatau durchgeführt.

Es wurde dieselbe Methodik wie bei der Berechnung des aktuellen Gletscherabflusses (Tab. 27, Kap. 3.2) angewandt.

Der Gletscherabfluss wurde für die Eisflächen berechnet, die im Gletscherkataster für den Zeitraum Ende der 1950er bis Anfang der 1960er Jahre angegeben werden. Flächen- und Volumenänderungen der nachfolgenden Jahre wurden nicht berücksichtigt. Feldforschungen sowie Luftbilder zeigen eine anhaltende Tendenz des Gletscherrückgangs. Abhängig vom Relief beträgt das Rückzugstempo 2,5 bis 6,2 m/Jahr. Neben der Flächenänderung ist auch das Einsinken der Oberfläche bedeutend. Auf dem Karabatkak, einem typischen Talgletscher, dünnte der mittlere Teil der Zunge von 1957 bis 1998 um 18,3 m aus und verlor damit ein Drittel seiner ursprünglichen Mächtigkeit.

Mit den vorhandenen Daten über die Verteilung von Gletscherfläche und –volumen mit der Höhe, über Schmelzwasseranfall und Schneeakkumulation wurde versucht, den Massenverlust der Gletscher bis zum Jahr 2000 zu berechnen.

Das glaziale Abflussvolumen beträgt auf der Südabdachung des Kungej Alatau 114,46 Mio. m³/a, auf der Nordabdachung des Terskej Alatau 424,64 Mio. m³/a. Die Jahresakkumulation wird im Kungej Alatau auf 21,734 Mio. m³ geschätzt, die Ablation auf 50,458 Mio. m³. Daraus berechnet sich ein jährliches Defizit von 28,715 Mio. m³. Von 1957 bis 2000 verloren die Gletscher demnach 1,26 km³ ihrer Masse bzw. 24,4% ihres ursprünglichen Volumens.

Die enormen Niederschlagsmengen in den Firnbereichen sind jedoch eine Garantie für das Fortbestehen der Gletscher im Terskej Alatau. Die Resultate der Bewegungsmessung zeigen eine Zunahme der Eisgeschwindigkeit mit der Entfernung von der Zunge. Während in einer Entfernung von 0,4–0,5 km von der Gletscherfront die Geschwindig-

keit 3,6–7,3 m/Jahr beträgt, steigt sie in einer Entfernung von 1,0–1,3 km bis auf 11,0–34,0 m/Jahr an. Der Transport des Eises aus dem Akkumulationsgebiet kompensiert somit teilweise den Verlust an Gletschermasse durch Schmelzprozesse.

4.5 Abflussänderungen in Teileinzugsgebieten mit unterschiedlichem Vergletscherungsgrad

Für einen aussagekräftigen Vergleich wurden die Flüsse Džergalan, Con-Kyzyl-Suu, Akterek, Kammenaja, Con-Aksu und Colpon-Ata herangezogen. Ihre Einzugsgebiete unterscheiden sich nicht nur bezüglich ihrer Gletscherfläche, sondern auch hinsichtlich anderer glaziologischer Charakteristika wie untere Gletschergrenze, Höhenlage der Firnlinie, AAR (Verhältnis der Fläche des Akkumulationsgebiets zur Gesamtfläche), Flächen-Höhen-Verteilung und Schmelzwasserproduktion.

Tab. 34: Flächen-Höhen-Verteilung und andere glaziologische und hydrologische Kenngrößen der Gletscher in verschiedenen Teileinzugsgebieten des Issyk-Kul'-Beckens.

	Terskej Alatau			Kungej Alatau		
	Akterek	Con-Kyzyl-Suu	Džergalan	Kammenaja	Con-Aksu	Colpon-Ata
Höhenintervall (m ü. M.)	(Km ²)					
3100-3200	-	0,300	-	-	-	-
3200-3300	-	0,900	-	-	-	-
3300-3400	0,314	2,200	-	-	0,689	-
3400-3500	1,062	2,800	-	-	2,346	-
3500-3600	1,401	3,000	0,075	0,069	3,100	-
3600-3700	1,836	3,400	0,497	0,221	4,346	0,191
3700-3800	2,507	4,400	0,545	0,234	6,455	0,830
3800-3900	2,786	4,700	0,611	0,303	8,372	1,310
3900-4000	2,870	4,500	0,465	1,013	8,986	1,737
4000-4100	2,563	3,900	0,294	1,083	8,801	1,812
4100-4200	2,192	3,400	0,013	0,277	7,671	1,584
4200-4300	1,901	3,200	-	-	4,880	1,331
4300-4400	1,258	2,500	-	-	3,417	1,141
4400-4500	1,246	2,000	-	-	2,885	0,364
4500-4600	1,246	1,100	-	-	2,453	-
4600-4700	1,246	0,800	-	-	0,771	-
4700-4800	0,472	0,200	-	-	0,088	-
Gesamtfläche	24,9	43,3	2,5	3,2	65,3	10,3
Höhe d. Firnlinie	3885	3790	3832	3893	4003	4102
AAR	0,62	0,62	0,47	0,75	0,47	0,43
	Abfluss vom Gletscher (Mio. m ³)					
Eisschmelze	6,152	18,275	0,833	1,072	28,893	3,578
Schnee- u. Firnschmelze	7,590	12,218	0,522	0,440	9,958	1,433
Flüssiger Niederschlag	7,669	14,253	1,160	1,031	19,874	3,600
Gesamter Gletscherabfluss	21,41	44,75	2,52	2,54	58,73	8,61

Die relativ gut entwickelte Vergletscherung der Einzugsgebiete des Akterek, Con-Kyzyl-Suu und Con-Aksu ist durch das Vorhandensein von Flächen in großen Höhenlagen bedingt. Der hohe AAR-Wert im Testgebiet Kammenaja ist durch die nördliche Exposition der Gletscherfläche zu erklären. In den gering vergletscherten Einzugsgebieten liegt die untere Gletschergrenze mit 3500–3700 m ü. M. auf einem Niveau, auf dem die Talgletscher in den anderen Gebieten noch enorme Flächen einnehmen. In den Einzugsgebieten des Con-Kyzyl-Suu und des Con-Aksu ist die Gletscherfläche einer einzigen Höhenzone (3600–3700 m ü. M.) jeweils größer als die gesamte vergletscherte Fläche in den Gebieten Džergalan und Kammenaja.

Wie ändert sich nun der Gletscherabfluss bis zum Jahr 2050 bei einem Temperaturanstieg um 1,4°C und der Erhöhung des Niederschlags um 10%? Obwohl die Vergletscherung bei solch einem Klimaszenario bis zur Mitte des Jahrhunderts stark zurückgeht, wird die Rolle der Gletscher bei der Abflussbildung weiterhin wachsen. Der Anstieg der Firnlinie verändert das Verhältnis zwischen Akkumulations- und Ablationsfläche, was auf vielen Gletschern zur Bildung einer mächtigen Moränendecke bis hin zum Übergang in Blockgletscher führen wird. Die für das Jahr 2050 berechneten glaziologischen und hydrologischen Kenngrößen sind in Tabelle 35 aufgeführt.

Tab. 35: Glazialhydrologische Kenngrößen im Jahr 2050.

	Terskej Alatau			Kungej Alatau		
	Akterek	Con-Kyzyl-Suu	Džergalan	Kammenaja	Con-Aksu	Colpon-Ata
Fläche (km²)	23,5	37,1	2,4	3,1	62,0	10,3
Höhe d. Firnlinie (m ü. M.)	4100	4100	4100	4300	4300	4300
AAR	0,40	0,35	-	-	0,15	0,15
	Abfluss vom Gletscher (Mio. m³)					
Eisschmelze	15,47	36,94	2,54	3,25	56,17	10,53
Schnee- u. Firnschmelze	4,73	6,43	0,01	-	3,04	0,12
Flüssiger Niederschlag	11,63	24,19	1,89	1,80	29,89	5,70
Gesamter Gletscherabfluss	31,83	67,56	4,44	5,05	89,10	16,35

Bei einem Vergleich der Werte aus den Tabellen 34 und 35 lassen sich keine Änderung in der Gesamthöhe des Gletscherabflusses erkennen. Während die Eisschmelze überall stark zunimmt, geht der Abfluss aus der Akkumulationszone stark zurück oder verschwindet ganz. Bedingt wird dies durch den Anstieg der Firnlinie bis zu einer Höhe von 4100 m ü. M. im Terskej Alatau und bis zu 4300 m ü. M. im Kungej Alatau und der damit verbundenen Verkleinerung der Nährgebiete.

Die Erhöhung der Schmelzintensität wird in Einzugsgebieten, in denen die vergletscherte Fläche 10 km² übersteigt, mehr für die Kompensation des Abflussdefizits sorgen, das aufgrund der Erwärmung entsteht, als dies die Niederschlagszunahme tun wird. Während unter gegenwärtigen klimatischen Bedingungen die Verdunstung in der Hochgebirgszone im Juli etwa 90 mm beträgt, so steigt sie bis zum Jahr 2050 um 19,6% an. Die Niederschläge nehmen jedoch nur um 10% zu. Bei diesen Klimaszenarien wird die Gletscherschmelze im Issyk-Kul'-Becken ihre dominierende Rolle beim Sommerabfluss noch lange Zeit beibehalten.

5. Zusammenfassung

Kapitel 2:

- Gegenwärtig nehmen die 834 Gletscher im Issyk-Kul'-Becken eine Fläche von 650,4 km² ein.
- Die Gletscher sind äußerst ungleichmäßig verteilt; 78,4% der Fläche konzentrieren sich am Nordhang des Terskej Alatau und nur 21,6% sind auf der Südabdachung des Kungej Alatau zu finden.
- Die größten Gletscherflächen befinden sich im Höhenintervall zwischen 3500 und 4500 m ü. M. und in nördlichen Expositionen.
- Die gegenwärtigen Klimabedingungen sind ungünstig für das Fortbestehen der Gletscher, die in den letzten 50 Jahren ein Drittel ihrer Masse verloren haben.
- Die Intensität des Schwunds ist abhängig von der Morphologie der Gletscher; am stärksten betroffen sind Talgletscher, am wenigsten Hanggletscher.
- Nach einer weiteren Klimaerwärmung um 2° bis zum Jahr 2025 würde sich die Gletscherfläche am weitgehend südexponierten Kungej Alatau auf 76,6%, die auf der Nordabdachung des Terskej Alatau auf 31,9% der heutigen Fläche reduzieren.

Kapitel 3:

- Das Issyk-Kul'-Becken ist abflusslos, sein Abflussvolumen wird auf 3,72 bis 3,91 km³ pro Jahr geschätzt. Davon werden zwischen 0,45 km³ und 1,14 Mio. km³ pro Jahr für landwirtschaftliche Zwecke entnommen. Hauptverbraucher ist der Bewässerungsfeldbau, der 95,3% beansprucht.
- Die physisch-geographische Heterogenität des Beckens bedingt eine Differenzierung der Flüsse hinsichtlich Art der Speisung und Jahresgang des Abflusses.
- Für alle Flüsse ist eine zunehmende Abflussspende mit der Höhe und der Zeitpunkt des maximalen Abflusses in der warmen Jahreszeit kennzeichnend.
- Die beträchtliche Vergletscherung des Beckens gewährleistet eine stabile Wasserführung der meisten Flüsse sogar in den Jahren, in denen der Niederschlag um 25-40% geringer ist als im Mittel.

- Der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss der Teileinzugsgebiete hängt vom Vergletscherungsgrad ab, der Korrelationskoeffizient dieser Beziehung beträgt $0,76 \pm 0,06$.
- Der Anteil des Gletscherschmelzwassers am Jahreabfluss schwankt zwischen 1,5% und 79,3%, der Mittelwert beträgt 17,5%. Im Sommer nimmt dieser Anteil um da 2-3fache zu.

Kapitel 4:

- Die gegenwärtige Vergletscherung des Issyk-Kul'-Beckens ist ein bedeutender Abflussfaktor, der eine stabile Wasserführung der Flüsse in der warmen Jahreszeit gewährleistet.
- Aufgrund der prognostizierten Temperaturerhöhung um $1,4^\circ$ bis zum Jahr 2050 und der Erhöhung der Niederschläge um 10% fallen die Gletschermassenbilanzen immer negativer aus. Obwohl die Gletscher dadurch auf Dauer an Fläche verlieren, nimmt ihre hydrologische Bedeutung zu.
- Der Anstieg der Firnlinie auf bis zu 4100–4300 m ü. M. führt auch in Becken mit einer gut entwickelten Vergletscherung zu einer Verringerung der AAR (accumulation area ratio) auf 0,35–0,4.
- Das Verhältnis zwischen den Abflüssen, die durch das Schmelzen des Eises in der Ablationszone und durch Schnee- und Firnschmelze in der Akkumulationszone gebildet werden, ist gestört. Die Sollseite der Gletschermassenbilanz nimmt stark zu.
- Zunächst wird sich die Gletscherdegradation in der Verringerung des Volumens bemerkbar machen, die bei fortgesetzter Erwärmung auch zu einer schnellen Verkleinerung der Gletscherfläche führt.
- Der Gletscherabfluss wird bis zum Jahr 2050 zunehmen.

6. Literaturverzeichnis

- Alamanov, C.K., Bakirova, C.B., Men'schikov, V.L.: Sovremennoe sostojanie i perspektivy kompleksnogo ispol'zovanija vodnych resursov rek (Gegenwärtige Situation und Perspektiven der komplexen Nutzung der Wasserressourcen der Flüsse). In: Otcet „Izmenenie geosistem Kyrgyzstana v uslovijach intensivnoj prirodno-antropogennoj nagruzki na ich komponenty“ (Bericht „Veränderung der Geosysteme Kirgistans unter den Bedingungen der anthropogenen Belastung“). Biškek, Institut geologii NAN KR, 2000, S. 35-54.
- Bakov, E.K.: Zakonomernosti dviženija i dinamiki lednikov Central'nogo Tjan'-Šanja (Gesetzmäßigkeiten der Bewegung und Dynamik der Gletscher des Zentralen Tienschan), Frunze 1983, 157 S..
- Bol'sakov, M.N.: Vodnye resursy rek Sovetskogo Tjan'-Šanja i metody ich rasceta (Wasserressourcen der Flüsse des sowjetischen Tienschan und Methoden ihrer Berechnung), Frunze 1974, 306 S.
- Budyko, M.N.: Antropogennoe izmenenie klimata (Anthropogene Veränderungen des Klimas), Leningrad, GIMIZ 1985, 405 S..
- Dikich, A.N., Michailova, V.I.: Režim lednikov i vodnyj balans severnogo sklona chrepta Terskej Ala-Tau (Gletscherregime und Wasserbilanz der nördlichen Abdachung des Terskej-Alatau), Moskva, Nauka 1976, 131 S.
- Dikich, A., Kuz'micenok, V.A.: Analiz kolebanij lednikov Vnutrennego Tjan'-Šanja po materialam s'emok v period MGG i 1997 g. (Analyse der Gletscherveränderungen des Inneren Tienschan nach den Aufnahmen während des MGG und im Jahre 1977). In: Gljaciologiceskie issledovanija v Kirgizii (Glaziologische Untersuchungen in Kirgistan), Frunze, Ilim 1981, S. 35-36.
- Dikich, A.N.: Regime sovremennogo oledeneniya Central'nogo Tjan'-Šanja (Regime der gegenwärtigen Vereisung im Zentralen Tienschan), Frunze, Ilim 1982, 159 S..
- Dikich, A.N., Dikich, L.L., Usabaliev, R.A.: Vodno-ledovye resursy Issyk-kul'skoj kotloviny i prognoz ich izmenenija k 2000-2025 gg. (Wasser- und Eisressourcen des Issyk-Kul-Beckens und ihre Entwicklungsprognose 2000-2025). In: Izvestija NAN KR, Problemy geologii i geografii v Kyrgyzstane (Nachrichten der NAN KR, Probleme der Geologie und Geografie in Kirgistan). Biškek, Ilim 1999, S. 80-84.

- Dikich, A.N.: Režim rek Issyk-Kul'skoj kotloviny v poslednej četvrti XX stoletija (Regime der Flüsse im Issyk-Kul-Becken im letzten Viertel des zwanzigsten Jahrhunderts). In: Meteorologija i gidrologija v Kyrgyzstane (Meteorologie und Hydrologie in Kirgistan). Ausgabe 2, Biškek 2002, S. 14-24.
- Djurgerov, M.B., Se Zicu, Lju Šaochaj [Hrsg.]: Oledenenie Tjan'-Šanja (Vergletscherung des Tienschan), Moskva 1995, 233 S.
- Erasov, N.V.: Metod opredelenija ob'ema gornych lednikov (Methode zur Bestimmung des Gletschervolumens). In: MGI, Ausgabe 14, Moskva 1968, S. 307-308.
- Fluctuations of Glaciers, Vol. VI (1985-1990). Haeberli, W & Hoelzle, M. [Hrsg.]. IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO, 319 S.; Zürich 1993.
- Katalog lednikov SSSR (Gletscherkatalog der UdSSR): Band 14, Ausgabe 2, Teil 5, Leningrad, GIMIZ 1976, 90 S.
- Konovalov, V.G.: Rascet i prognoz tajanija lednikov Srednej Azii (Berechnung und Prognose der Gletscherschmelze in Zentralasien), Leningrad, GIMIZ 1979, 232 S..
- Kotljakov, V.M. [Hrsg.]: Gljaciologičeskij slovar' (Glaziologisches Wörterbuch). Leningrad, GIMIZ 1984, 528 S.
- Kuz'micenok, V.A.: Ocenocnye dannye o kolebanijach nekotorych lednikov Central'nogo Tjan'-Šanja (Daten zur Bewertung der Veränderung einiger Gletscher des Zentralen Tienschan). In: Režim lednikov Central'nogo Tjan'-Šanja (Gletscherregime des Zentralen Tienschan), Frunze, Ilim 1986.
- Kurbatkin, V.P., Skiba, E.S., Ušinceva, V.F.: Charakteristika sinoptičeskich processov v Kirgisii (Charakteristika synoptischer Prozesse in Kirgistan). In: SANIGMI, Ausgabe 75 (156), Leningrad 1980, S. 61-73.
- Pavlova, I.A.: Povtorjaemost' tipov sinoptičeskich processov v Cuijskoj doline (Häufigkeit des Auftretens synoptischer Prozesse im Cu-Tal). In: Meteorologija i gidrologija v Kyrgyzstane (Meteorologie und Hydrologie in Kirgistan). Ausgabe 1, Bischkek 2001, S. 102-110.
- Podrezov, O.A., Dikich, A.N., Bakirov, K.B.: Izmencivost' klimatičeskich uslovij oledenjenja Tjan'-Šanja za poslednie 100 let (Veränderung klimatischer Bedingungen während der Vereisung des Tienschan während der letzten 100 Jahre). In: Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavjanskogo Universiteta (Nachrichten der Kirgisisch-Russischen Slawischen Universität), Band 1, Nr. 3, Biškek 2001, S. 33-40.

Ponomarenko, P.N.: Atmosfernye osadki Kirgisii (Atmosphärische Niederschläge in Kirgistan), Leningrad, GIMIZ, 1976, 134 S.

Rjazanceva, Z.A. [Hrsg.]: Klimat Kirgizskoj SSR (Klima der Kirgisischen SSR), Frunze, Ilim 1965, 209 S.

Sydykov, J.: Osnovnye certy sovremennogo oledeneniya bassejna reki Con-Aksu (Južnyj sklon chrebtu Kungej Ala-Too) (Grundzüge der gegenwärtigen Vergletscherung im Becken des Con-Aksu (Südhang des Kungej Ala-Too)). In: Glaciologiceskie issledovanija na Tjan'-Šane (Glaziologische Untersuchungen im Tienschan), Frunze, Ilim 1975, S. 48-57.

UNDP: First National Communication of the Kyrgyz Republic under the UN Framework Convention on Climate Change. 98 S., Biškek 2003.

Ventcel', E.S.: Teorija verojatnostej (Wahrscheinlichkeitstheorie), Moskva, FIZMATIZ-DAT 1962, 576 S.

WGMS: Glacier Mass Balance Bulletin No. 5 (1996-1997). IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO, 96 S., Zürich 1999.

Zabirov, R.D. [Hrsg.]: Lednik Turgen'-Aksu (Gletscher Turgen'-Aksu), Frunze, Ilim 1976, 106 S.

Bisherige Veröffentlichungen in dieser Reihe:

- No. 1 HERRMANN, R., KRAMB, M. C., MÖNNICH, Ch. (12.2000): Tariff Rate Quotas and the Economic Impacts of Agricultural Trade Liberalization in the WTO. (etwas revidierte Fassung erschienen in: "International Advances in Economic Research", Vol. 7 (2001), Nr. 1, S. 1-19.)
- No. 2 BOHNET, A., SCHRATZENSTALLER, M. (01.2001): Der Einfluss der Globalisierung auf staatliche Handlungsspielräume und die Zielverwirklichungsmöglichkeiten gesellschaftlicher Gruppen. (erschieden in: "List-Forum für Wirtschafts- und Finanzpolitik", Bd. 27(2001), H. 1, S. 1-21.)
- No. 3 KRAMB, M. C. (03.2001): Die Entscheidungen des "Dispute Settlement"-Verfahrens der WTO im Hormonstreit zwischen der EU und den USA – Implikationen für den zukünftigen Umgang mit dem SPS-Abkommen. (überarbeitete Fassung erschienen in: "Agrarwirtschaft", Jg. 50, H. 3, S. 153-157.)
- No. 4 CHEN, J., GEMMER, M., TONG, J., KING, L., METZLER, M. (08.2001): Visualisation of Historical Flood and Drought Information (1100-1940) for the Middle Reaches of the Yangtze River Valley, P.R. China. (erschieden in: Wu et al. (eds) Flood Defence '2002, Beijing, New York 2002, pp. 802-808.)
- No. 5 SCHROETER, Ch. (11.2001): Consumer Attitudes towards Food Safety Risks Associated with Meat Processing. (geänderte und gekürzte Fassung ist erschienen unter Christiane SCHROETER, Karen P. PENNER, John A. FOX unter dem Titel "Consumer Perceptions of Three Food Safety Interventions Related to Meat Processing" in "Dairy, Food and Environmental Sanitation", Vol. 21, No. 7, S. 570-581.)
- No. 6 MÖNNICH, Ch. (12.2001): Zollkontingente im Agrarsektor: Wie viel Liberalisierungsfortschritt? Ergebnisse und Diskussion einer Auswertung der EU-Daten. (gekürzte Fassung erschienen in BROCKMEIER, M., ISERMEYER, F., von CRAMON-TAUBADEL, S. (Hrsg.), Liberalisierung des Weltagrarhandels - Strategien und Konsequenzen. "Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.", Bd. 37(2002), S. 51-59.)
- No. 7 RUBIOLO, M. (01.2002): EU and Latin America: Biregionalism in a Globalizing World?
- No. 8 GAST, M. (02.2002): Zollkontingente bei US-amerikanischen Käseimporten. (gekürzte Fassung erschienen in: "Agrarwirtschaft", Jg. 51, H. 4, S. 192-202.)
- No. 9 BISCHOFF, I. (08.2002): Efficiency-enhancing Effects of Private and Collective Enterprises in Transitional China.

- No. 10 KÖTSCHAU, K. M., PAWLOWSKI, I., SCHMITZ, P. M. (01.2003): Die Policy Analysis Matrix (PAM) als Instrument zur Messung von Wettbewerbsfähigkeit und Politikeinfluss - Zwischen Theorie und Praxis: Das Fallbeispiel einer ukrainischen Molkerei.
- No. 11 HERRMANN, R., MÖSER A. (06.2003): Price Variability or Rigidity in the Food-retailing Sector? Theoretical Analysis and Evidence from German Scanner Data.
- No. 12 TROUCHINE, A. (07.2003): Trinkwasserversorgung und Armut in Kasachstan: Aktueller Zustand und Wechselwirkungen.
- No. 13 WANG, R.; GIESE, E.; GAO, Q. (08.2003): Seespiegelschwankungen des Bosten-Sees (VR China).
- No. 14 BECKER, S.; GEMMER, M.; JIANG, T.; KE, CH.. (08.2003): 20th Century Precipitation Trends in the Yangtze River Catchment.
- No. 15 GEMMER, M.; BECKER, S.; JIANG, T (11. 2003): Detection and Visualisation of Climate Trends in China.
- No. 16 MÖNNICH, Ch. (12.2003):
Tariff Rate Quotas: Does Administration Matter?
- No. 17 GIESE, E.; MOßIG, I. (03.2004)
Klimawandel in Zentralasien
- No. 18 GIESE, E.; Sehring, J. Troughine, A. (05.2004)
Zwischenstaatliche Wassernutzungskonflikte in Zentralasien
- No. 19 Dikich, A.N.; Hagg, W. (09.2004)
Gletscherwasserressourcen in Zentralasien

in Vorbereitung:

- No. 20 CHRISTIANSEN, T. GIESE, E.; Schöner, U. (11.2004)
Das obere Ilital

Stand 28. Oktober 2004

Die Diskussionsbeiträge können im Internet unter:

<http://www.uni-giessen.de/zeu/Publikation.html> eingesehen werden.